

دیوار برشی فولادی و مدلسازی در ETABS

فهرست مطالب

| | |
|--|----|
| ۱-۱- مقدمه | ۲ |
| ۲-۱- بیان مسئله | ۲ |
| ۲-۱- مقدمه | ۶ |
| ۲-۲- دیوار برشی فولادی | ۶ |
| ۱-۲-۲- معرفی و نمونه‌های اولیه به کار رفته | ۶ |
| ۲-۲-۲- مزایا و معایب دیوار برشی فولادی | ۱۰ |
| ۳-۲-۲- عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی فولادی | ۱۱ |
| ۴-۲-۲- کاربرد دیوار برشی فولادی در سازه‌ها | ۱۲ |
| ۵-۲-۲- ساختار و عملکرد دیوار برشی فولادی | ۱۳ |
| ۶-۲-۲- انواع دیوار برشی فولادی | ۱۶ |
| ۱-۶-۲-۲- جدار نازک (سخت نشده) | ۱۶ |
| ۲-۶-۲-۲- سخت شده (افقی و قائم) | ۲۰ |
| ۳-۶-۲-۲- دیوار برشی فولادی مرکب (کامپوزیت) | ۲۳ |
| ۳-۲- پیشینه تحقیق | ۲۴ |
| ۱-۳-۲- مدل‌های آزمایشگاهی محرمی و حبیب نژاد | ۲۴ |
| ۲-۳-۲- مدل‌های تحلیلی سادات خلریدی و برخورداری | ۲۹ |
| ۳-۳-۲- مدل‌های آزمایشگاهی چوی و همکاران | ۳۳ |
| ۴-۳-۲- مدل‌های آزمایشگاهی پارک و همکاران | ۳۶ |
| ۵-۳-۲- مدل‌های آزمایشگاهی شکسته‌بند و همکاران | ۴۰ |
| ۶-۳-۲- تحقیق وانگ و همکاران | ۴۳ |

| | |
|----------|--|
| ۴۴..... | تحقیق کریشنان و همکاران ۷-۳-۲ |
| ۴۴..... | تحقیق بای و همکاران ۸-۳-۲ |
| ۴۵..... | تحقیق حمیدیا و همکاران ۹-۳-۲ |
| ۴۵..... | تحقیق کائو و همکاران ۱۰-۳-۲ |
| ۴۶..... | تحقیق ژانگ و همکاران ۱۱-۳-۲ |
| ۴۶..... | تحقیق آبراهام و همکاران ۱۲-۳-۲ |
| ۴۸..... | مقدمه ۱-۳ |
| ۴۹..... | مدلسازی ۲-۳ |
| ۴۹..... | کلیات ۱-۲-۳ |
| ۵۲..... | مشخصات مصالح ۲-۲-۳ |
| ۵۳..... | مشخصات بارگذاری ۳-۲-۳ |
| ۵۴..... | مقاطع سازه ۴-۲-۳ |
| ۵۵..... | روش‌های تحلیل دیوار برشی فولادی ۳-۳ |
| ۵۵..... | روش مدل نواری ۱-۳-۳ |
| ۵۸..... | روش مدل غشائی غیر همسان ۲-۳-۳ |
| ۵۹..... | روش تحلیل غیرخطی ۳-۳-۳ |
| ۵۹..... | روش تحلیل اجزاء محدود ۴-۳-۳ |
| ۵۹..... | مدلسازی دیوار برشی فولادی در ETABS ۴-۳ |
| ۶۸..... | نتایج نسبت نیرو به ظرفیت اعضا ۱-۴ |
| ۱۱۸..... | منابع |

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲، پلان و مقطع ساختمان شینجوکونومورا ۸
- شکل ۳-۲، نمونه تیپ دیوار برشی فولادی به کار رفته در بیمارستان آلیو ویو لس آنجلس ۹
- شکل ۴-۲، اعضای سیستم دیوار برشی فولادی ۱۴
- شکل ۵-۲، اتصال گیردار (سمت راست) و مفصلی (سمت چپ) ۱۵
- شکل ۶-۲، مشابهت دیوار برشی فولادی و تیورور فولادی ۱۶
- شکل ۷-۲، دیوار برشی فولادی جدارنازک ۱۷
- شکل ۸-۲، تبدیل تنش برشی خالص به تنش های کششی و فشاری ۱۸
- شکل ۹-۲، نمونه از ورق کمانش کرده و چروکیده شده ۱۹
- شکل ۱۰-۲، تشابه عملکرد عضو مهاربندی با ورق فولادی تحت اثر تنش های کششی و فشاری ۲۰
- شکل ۱۱-۲، دیوار برشی فولادی سخت شده ۲۱
- شکل ۱۲-۲، دیوار برشی فولادی با ورق موجدار ۲۲
- شکل ۱۳-۲، دیوار برشی حفره دار ۲۳
- شکل ۱۴-۲، نمونه ای از دیوار برشی کوپله و استفاده از سخت کننده در اطراف باز شو ۲۳
- شکل ۱۵-۲، جزئیات دیوار برشی کامپوزیت ۲۴
- شکل ۱۶-۲، مدل ترکیبی نمونه های مورد مطالعه توسط محرمی و همکاران ۲۵
- شکل ۱۷-۲، سیکل های بارگذاری نمونه با ستون های 2UNP160 در تحقیق محرمی و همکاران ۲۶
- شکل ۱۸-۲، منحنی هیستریزیس قاب تقویت شده به وسیله دیوار برشی با ستون های 2UNP160 در تحقیق محرمی و همکاران ۲۶
- شکل ۱۹-۲، کمانش ورق در سیکل هجدهم در نمونه با ستون های 2UNP160 ۲۷
- شکل ۲۰-۲، سیکل های بارگذاری نمونه با ستون های 2UNP120 در تحقیق محرمی و همکاران ۲۸

- شکل ۲-۲۱، منحنی هیستریزیس دیوار برشی فولادی با ستون‌های 2UNP120 در تحقیق محرمی و همکاران ۲۸
- شکل ۲-۲۲، گسیختگی ورق در نمونه با ستون‌های 2UNP120 در تحقیق محرمی و همکاران ۲۹
- شکل ۲-۲۳، تأثیر ضخامت ورق با تنش تسلیم ۲۰۰ مگا پاسکال بر مقاومت سیستم در تحقیق سادات خلردی و برخورداری ۳۰
- شکل ۲-۲۴، تأثیر ضخامت ورق با تنش تسلیم ۱۰۰ مگا پاسکال بر مقاومت سیستم در تحقیق سادات خلردی و برخورداری ۳۰
- شکل ۲-۲۵، تأثیر مقدار تنش تسلیم ورق بر مقاومت سیستم با ورق به ضخامت ۱ میلی‌متر در تحقیق سادات خلردی و برخورداری ۳۱
- شکل ۲-۲۶، تأثیر مقدار تنش تسلیم ورق بر مقاومت سیستم با ورق به ضخامت ۳ میلی‌متر در تحقیق سادات خلردی و برخورداری ۳۲
- شکل ۲-۲۸، مقاومت نهایی نمونه‌های با ضخامت‌ها و تنش‌های تسلیم متفاوت ورق جان در تحقیق سادات خلردی و برخورداری ۳۳
- شکل ۲-۲۸، نمونه آزمایشگاهی با اتصال بخشی در تحقیق Choi و Park ۳۴
- شکل ۲-۲۹، نمونه آزمایشگاهی با اتصال کامل در تحقیق Choi و Park ۳۴
- شکل ۲-۳۰، منحنی هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی معمولی در تحقیق Choi و Park ۳۵
- شکل ۲-۳۱، منحنی هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با اتصال بخشی در تحقیق Choi و Park ۳۵
- شکل ۲-۳۲، تغییر شکل نمونه‌های FSPW2 و FSPW4 در بارگذاری نهایی در تحقیق Choi و Park ۳۶
- شکل ۲-۳۳، ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی Park و همکاران ۳۸
- شکل ۲-۳۳، منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های آزمایشگاهی Park و همکاران ۳۸
- شکل ۲-۳۴، کمانش ستون نمونه طبقه اول در نمونه WC4T در تحقیق Park و همکاران ۳۹
- شکل ۲-۳۵، انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌های آزمایشگاهی Park و همکار در طی بارگذاری در تحقیق Park و همکاران ۴۰
- شکل ۲-۳۶، طرح کلی نمونه‌های مورد آزمایش ۴۱

شکل ۲-۳۷، منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های مورد آزمایش؛ a: نمونه SSW-BO-1؛ b: نمونه SSW-BO-2؛ C: نمونه SSW-BO-3؛ d: نمونه SSW-BO-4..... ۴۲

شکل ۲-۳۸، پوش منحنی هیستریزیس نمونه‌های آزمایشگاهی ۴۳

شکل ۳-۱، مدلسازی سازه‌های ۵ طبقه بصورت منظم و نامنظم در پلان ۵۰

شکل ۳-۲، مدلسازی سازه‌های ۷ طبقه بصورت منظم و نامنظم در پلان ۵۱

شکل ۳-۳، مدلسازی سازه‌های ۱۲ طبقه بصورت منظم و نامنظم در پلان ۵۲

شکل ۳-۴، مدل نواری دیوار برشی فولادی جهت تحلیل ۵۶

شکل ۳-۵، مدل غشائی دیوار برشی فولادی جهت تحلیل ۵۸

شکل ۳-۶، تعریف ورق برای دیوار برشی فولادی ۶۱

شکل ۳-۷، ترسیم المان افقی در تراز Base قاب دارای دیوار برشی ۶۲

شکل ۳-۸، تقسیم‌بندی تیرها و ستون‌های قاب ۶۳

شکل ۳-۹، ترسیم المان‌های مورب ۶۳

شکل ۳-۱۰، یکپارچه نمودن المان‌های تقسیم‌بندی شده ۶۴

شکل ۳-۱۱، چرخش محور محلی المان‌های مورب ۶۵

شکل ۳-۱۲، غیرفعال کردن مقاومت فشاری المان‌های مورب ۶۵

شکل ۳-۱۳، طراحی المان‌های مورب دیوار برشی ۶۶

شکل ۴-۱، مقایسه نسبت نیرو به ظرفیت قاب بحرانی سازه ۵ طبقه با و بدون دیوار برشی فولادی؛ الف) منظم بدون دیوار برشی، ب) منظم با دیوار برشی، ج) نامنظم بدون دیوار برشی، د) نامنظم با دیوار برشی ۶۹

شکل ۴-۲، مقایسه نسبت نیرو به ظرفیت قاب بحرانی سازه ۷ طبقه با و بدون دیوار برشی فولادی؛ الف) منظم بدون دیوار برشی، ب) منظم با دیوار برشی، ج) نامنظم بدون دیوار برشی، د) نامنظم با دیوار برشی ۷۰

شکل ۴-۳، مقایسه نسبت نیرو به ظرفیت قاب بحرانی سازه ۱۲ طبقه با و بدون دیوار برشی فولادی؛ الف) منظم بدون دیوار برشی، ب) منظم با دیوار برشی، ج) نامنظم بدون دیوار برشی، د) نامنظم با دیوار برشی ۷۱

فهرست جداول

- جدول ۱-۲، مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی محرمی و همکاران ۲۵
- جدول ۲-۲، مشخصات ستون‌های فرعی متصل به ورق در تحقیق محرمی و همکاران ۲۵
- جدول ۳-۲، مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی Park و همکاران ۳۷
- جدول ۴-۲، نتایج حاصل از آزمایش برای نمونه‌های آزمایشگاهی Park و همکاران ۳۹
- جدول ۵-۲، جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی شکسته‌بند و همکاران ۴۱
- جدول ۶-۲، مقاومت حاصل از تحلیل چرخه‌ای برای نمونه‌های مورد آزمایش ۴۲
- جدول ۱-۳، مشخصات مصالح بتن ۵۲
- جدول ۲-۳، مشخصات مصالح فولاد ۵۳
- جدول ۳-۳، بارهای ثقلی سازه ۵۳
- جدول ۴-۳، محاسبه ضریب زلزله و ضریب توزیع برش پایه سازه قاب خمشی ۵۳
- جدول ۵-۳، مقاطع استفاده شده در سازه ۵۴

فصل اول

مقدمه و کلیات

سیستم دیوار برشی فولادی به عنوان یکی از کارآمدترین سامانه‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی طی سه دهه اخیر در کشورهای زلزله‌خیز به‌ویژه ژاپن و آمریکا به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستم متشکل از ورق‌های فولادی متصل به تیرها و ستون‌های پیرامونی بوده و به صورت پیوسته در یک یا چند دهانه در ارتفاع ساختمان اجرا می‌شود و یک دیواره طره‌ای مستحکم ایجاد می‌نماید. بهره‌گیری از این دیوارها در ساختمان‌های مهمی نظیر بیمارستان شش‌طبقه در لس‌آنجلس در دهه ۸۰ میلادی، مرکز درمانی پرتلند (۲۰۰۸)، ساختمان بین‌المللی لاس‌وگاس (۲۰۰۹) و برج اداری ۳۵ طبقه کوبه ژاپن، نمونه‌ای از کاربرد عملی این سیستم است. اضافه شدن دیوار برشی فولادی به سازه‌های فولادی موجب افزایش سختی جانبی، کاهش تغییر مکان‌های غیرمطلوب، بهبود ظرفیت جذب انرژی و تأخیر در بروز خستگی سیکلی می‌گردد. از منظر لرزه‌ای، این سیستم توانایی بالایی در کنترل تغییر شکل‌های غیرالاستیک و جلوگیری از فروپاشی پیشرونده سازه دارد. در مقابل، قاب‌های خمشی که تنها از تیر و ستون‌های صلب تشکیل می‌شوند، فاقد عناصر کمکی مانند مهاربند یا دیوار برشی بوده و بارهای جانبی صرفاً از طریق رفتار خمشی اتصالات منتقل می‌شوند. اگرچه قاب‌های خمشی انعطاف‌پذیری بالایی دارند، اما سختی جانبی آنها نسبت به سیستم‌های دارای دیوار برشی یا مهاربندی کمتر بوده و کنترل تغییر مکان‌های جانبی در آنها چالش‌برانگیز است. بنابراین استفاده ترکیبی از سازه فولادی با دیوار برشی فولادی می‌تواند راهکاری مؤثر برای ارتقای عملکرد لرزه‌ای و بهره‌وری سازه‌های بلندمرتبه و حساس به شمار آید.

۱-۲- بیان مسئله

زلزله به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی، همواره تهدیدی جدی برای پایداری و عملکرد سازه‌ها به شمار می‌رود و بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها از دغدغه‌های اصلی مهندسان عمران محسوب می‌شود. میزان مقاومت لرزه‌ای ساختمان‌ها به دو عامل کلیدی، یعنی سختی و شکل‌پذیری وابسته است؛ به‌طوری‌که سختی موجب کنترل تغییر شکل‌های جانبی و شکل‌پذیری باعث افزایش ظرفیت جذب و اتلاف انرژی در هنگام

بارگذاری سیکلی می‌گردد. در این میان، یکی از مسائل مهم طراحی لرزه‌ای آن است که آیا می‌توان سیستمی باربر جانبی را به کار گرفت که هر دو ویژگی مذکور را به صورت همزمان دارا باشد. اهمیت این موضوع زمانی دوچندان می‌شود که بدانیم بسیاری از زیرساخت‌های حیاتی نظیر بیمارستان‌ها، مراکز درمانی، ساختمان‌های اداری و شبکه‌های خدماتی، نقشی حیاتی در تداوم فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی جامعه دارند و افت عملکرد آن‌ها پس از زلزله می‌تواند خسارات ثانویه سنگینی به دنبال داشته باشد. از این رو، ارزیابی و توسعه سیستم‌های باربر جانبی که علاوه بر تأمین سختی کافی، شکل‌پذیری مناسبی نیز داشته باشند، یکی از راهکارهای اصلی در ارتقای ایمنی و پایداری لرزه‌ای سازه‌ها محسوب می‌شود. این امر نه تنها موجب کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری می‌گردد بلکه امکان تداوم خدمات حیاتی جامعه پس از وقوع زلزله را نیز فراهم می‌سازد.

در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، کنترل تغییرشکل‌های جانبی و تأمین سختی و شکل‌پذیری کافی از چالش‌های اصلی مهندسان سازه به شمار می‌رود. سیستم‌های متداول مانند قاب خمشی صرفاً بر اساس رفتار خمشی اتصالات عمل کرده و اگرچه از نظر انعطاف‌پذیری مطلوب هستند، اما به دلیل سختی جانبی محدود، معمولاً در ساختمان‌های بلند و سازه‌های با اهمیت بالا پاسخ مناسبی در برابر زلزله ارائه نمی‌دهند. از سوی دیگر استفاده از سیستم‌های مهاربندی شده نیز با محدودیت‌هایی از جمله اشغال فضا، موانع معماری و ضعف در ظرفیت جذب انرژی مواجه است. در این میان، دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی طی سه دهه اخیر مورد توجه پژوهشگران و طراحان قرار گرفته است. این سیستم با بهره‌گیری از ورق‌های فولادی نازک متصل به تیر و ستون‌های پیرامونی، رفتاری مشابه تیر ورق طره‌ای ایجاد کرده و علاوه بر افزایش سختی جانبی، توان بالایی در جذب و اتلاف انرژی لرزه‌ای دارد. کاربرد گسترده این سیستم در سازه‌های مهم در کشورهای زلزله‌خیز همچون ژاپن و آمریکا نشان‌دهنده کارایی آن در بهبود عملکرد لرزه‌ای و کاهش آسیب‌پذیری سازه‌هاست. با این حال، به دلیل نسبتاً نوظهور بودن این سیستم در مقایسه با سایر سامانه‌های مقاوم، هنوز نیاز به مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بیشتر جهت بررسی رفتار دقیق، تعیین پارامترهای طراحی بهینه و تدوین ضوابط اجرایی بومی وجود دارد. از این رو پرداختن به بررسی دیوار برشی

فولادی می‌تواند به رفع بخشی از خلأهای علمی و عملی موجود کمک کرده و راهکارهایی مؤثر برای ارتقای ایمنی و پایداری لرزه‌ای سازه‌ها فراهم آورد [۲ و ۱].

در سه دهه اخیر، به‌کارگیری دیوار برشی فولادی به‌عنوان یکی از سیستم‌های نوین باربر جانبی در ساختمان‌ها به‌طور گسترده مورد توجه پژوهشگران و طراحان قرار گرفته است. این سیستم که به دلیل ویژگی‌هایی نظیر سختی جانبی بالا، شکل‌پذیری مناسب و توانایی چشمگیر در جذب انرژی لرزه‌ای شناخته می‌شود، به‌سرعت جایگاه ویژه‌ای در طراحی لرزه‌ای پیدا کرده است. دیوارهای برشی فولادی نه‌تنها در ساخت ساختمان‌های جدید، بلکه در تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود نیز به‌کار می‌روند و به‌ویژه در کشورهای با لرزه‌خیزی بالا همچون آمریکا و ژاپن به‌عنوان یک گزینه مؤثر در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها شناخته شده‌اند [۳ و ۴].

از دیدگاه اجرایی، دیوار برشی فولادی سیستمی ساده و کارآمد محسوب می‌شود که اجرای آن نیازمند پیچیدگی‌های خاص یا مهارت‌های ویژه‌ای نیست. مهندسان، تکنسین‌ها و کارگران فنی با دانش متعارف موجود در زمینه ساخت سازه‌های فولادی می‌توانند این سیستم را به‌راحتی اجرا نمایند، بدون آن‌که نیاز به آموزش‌های جدید یا مهارت‌های تخصصی داشته باشند. سطح دقت موردنیاز در اجرای دیوار برشی فولادی در حد دقت‌های معمول در ساخت سازه‌های فولادی است و رعایت این دقت‌ها منجر به افزایش ضریب اطمینان اجرایی در مقایسه با بسیاری از سیستم‌های مقاوم جانبی دیگر می‌گردد. علاوه بر این، امکان ساخت و آماده‌سازی قطعات دیوار برشی فولادی در کارخانه و انتقال آن‌ها به محل پروژه باعث افزایش سرعت نصب و کاهش مدت زمان اجرای پروژه می‌شود. به همین دلیل، استفاده از این سیستم نه‌تنها موجب صرفه‌جویی اقتصادی در هزینه‌های اجرایی می‌گردد، بلکه کارایی آن را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای پروژه‌های جدید و حتی مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود دوچندان می‌کند [۳].

فصل دوم

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

دیوار برشی فولادی به ساختارهایی اطلاق می‌شود که عمدتاً از ورق‌های فولادی تشکیل شده و به منظور مقاومت در برابر بارهای جانبی، مانند زلزله و باد، در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دیوارها معمولاً به صورت عمودی در داخل یا خارج قاب سازه قرار گرفته و نقش یک عنصر مقاومتی اصلی را ایفا می‌کنند. دیوارهای برشی فولادی در کاربردهای مختلف سازه‌ای به کار گرفته می‌شوند، از جمله در ساختمان‌های بلند و برج‌ها به منظور افزایش سختی جانبی و کنترل تغییرشکل‌ها، در ساختمان‌های صنعتی و کارخانه‌ها برای ارتقای استحکام و پایداری، و در پروژه‌های مسکونی جهت بهبود ایمنی در برابر زلزله. به دلیل ویژگی‌هایی مانند سختی بالا، شکل‌پذیری مناسب، قابلیت جذب انرژی لرزه‌ای و امکان نصب سریع، دیوار برشی فولادی به عنوان یکی از عناصر کلیدی در طراحی سازه‌های مدرن شناخته می‌شود و می‌تواند نقش مؤثری در افزایش ایمنی و عملکرد سازه در برابر بارهای جانبی ایفا نماید. استفاده از این سیستم، به ویژه در مناطق زلزله‌خیز، انتخابی مقرون‌به‌صرفه و عملیاتی برای بسیاری از پروژه‌های ساختمانی محسوب می‌شود.

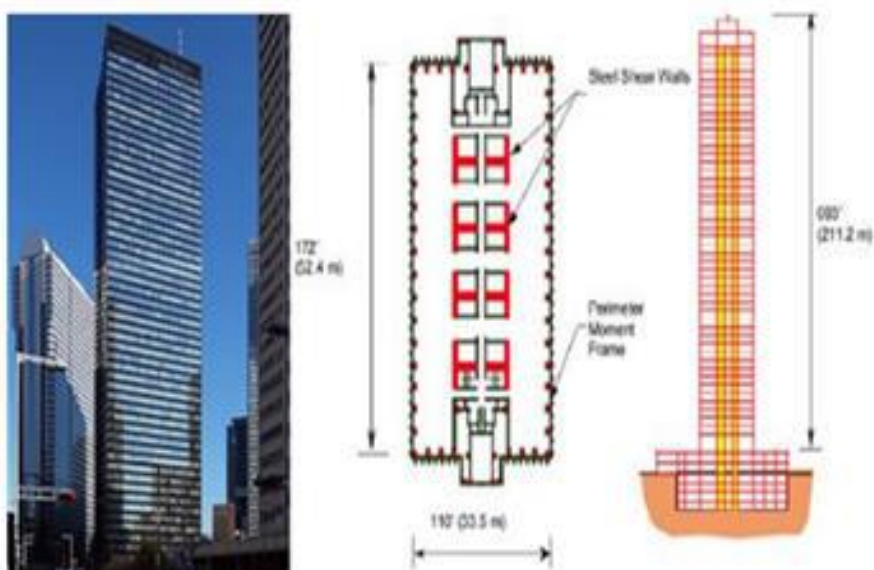
۲-۲- دیوار برشی فولادی

۲-۲-۱- معرفی و نمونه‌های اولیه به کار رفته

دیوار برشی فولادی (Steel Plate Shear Wall یا SPSW) یک سیستم مقاوم جانبی است که از ورق‌های فولادی تشکیل شده و به منظور مقاومت در برابر بارهای جانبی مانند زلزله و باد در سازه‌ها استفاده می‌شود. این دیوارها معمولاً به صورت عمودی در داخل یا خارج از سازه قرار می‌گیرند و به عنوان یک عنصر مقاومتی عمل می‌کنند. ورق‌های فولادی به کار رفته در این دیوارها می‌توانند به صورت صاف یا موج‌دار باشند و به تیرها و ستون‌های پیرامونی متصل می‌شوند تا سختی و شکل‌پذیری سازه را افزایش دهند [۵].

در دهه ۱۹۷۰ میلادی، تحقیقات گسترده‌ای توسط تاکاهاشی و همکارانش در ژاپن در زمینه استفاده از دیوار برشی فولادی آغاز شد و این تحقیقات پایه‌ای برای توسعه سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای جانبی

در ساختمان‌ها فراهم آورد. از این زمان، دیوار برشی فولادی به‌ویژه در ساختمان‌های بلند به عنوان یک سیستم سازه‌ای مؤثر برای مقابله با زلزله مورد توجه قرار گرفت، چرا که این سیستم توانایی بالایی در جذب انرژی و کاهش تغییر مکان‌های جانبی ساختمان دارد. با گذشت زمان و افزایش کاربرد این فناوری، استانداردها و آیین‌نامه‌های متعددی برای طراحی و اجرای دیوار برشی فولادی تدوین شد؛ از جمله آیین‌نامه AISC در سال ۲۰۰۵ که ضوابط دقیقی برای رفتار لرزه‌ای این سیستم ارائه نمود. در کشورهای زلزله‌خیز مانند ژاپن و آمریکا، دیوار برشی فولادی نه تنها در ساختمان‌های جدید بلکه برای تقویت سازه‌های موجود نیز کاربرد گسترده‌ای یافته است. این سیستم به دلیل سهولت اجرا، مقاومت بالا و کاهش چشمگیر تغییر شکل‌ها، گزینه‌ای مناسب برای مقاوم‌سازی سازه‌ها به شمار می‌رود. از نمونه‌های شاخص استفاده از این سیستم می‌توان به ساختمان‌های شینجو کونومورا و نیپون استیل در توکیو اشاره کرد که در سال ۱۹۷۰ میلادی ساخته شدند که در اشکال (۱) و (۲) و (۲-۲) نشان داده شده است. و به عنوان اولین ساختمان‌هایی شناخته می‌شوند که از دیوار برشی فولادی بهره برده‌اند. تجربه موفق این پروژه‌ها، راه را برای توسعه فناوری دیوار برشی فولادی در سایر نقاط جهان هموار کرد. به مرور زمان، مهندسان با بهره‌گیری از تحقیقات تجربی و تحلیلی، توانستند عملکرد لرزه‌ای این سیستم را بهبود بخشند و طراحی سازه‌ها را ایمن‌تر و اقتصادی‌تر کنند. این تحولات موجب شده است که دیوار برشی فولادی به یک راهکار استاندارد و قابل اعتماد برای مقابله با زلزله در ساختمان‌های بلند تبدیل شود. امروزه، کاربرد دیوار برشی فولادی نه تنها در ژاپن بلکه در بسیاری از کشورهای دنیا به ویژه مناطقی که در معرض زلزله هستند، گسترش یافته و به عنوان یک فناوری کلیدی در مهندسی سازه شناخته می‌شود [۱].



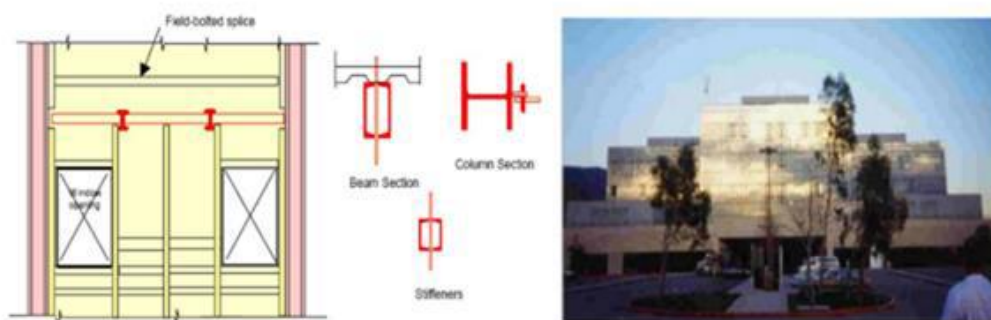
شکل ۱-۲، پلان و مقطع ساختمان شینجوکونومورا [۶]



شکل ۲-۲، ساختمان نیپون استیل [۶]

در ساختمان نیپون استیل، دو سیستم عمده برای مقاومت در برابر بارهای جانبی پیش‌بینی شده بود؛ به گونه‌ای که در جهت عرضی تنها از دیوار برشی فولادی استفاده شد، در حالی که در جهت طولی علاوه بر دیوار برشی فولادی، از قاب‌های خمشی فولادی نیز بهره گرفته شد تا مقاومت سازه در برابر نیروهای جانبی

افزایش یابد. در ساختمان شینجوکونومورا نیز برای اجتناب از به‌کارگیری دیوار برشی بتنی، از سیستم دیوار برشی فولادی در هسته‌های مرکزی که شامل آسانسورها، پله‌ها و رایزرهای تأسیساتی بود، استفاده شد. برای جلوگیری از کمانش در این دیوارها، از بازسخت‌کننده‌ها بهره گرفته شد تا پایداری و عملکرد لرزه‌ای آنها تضمین شود. نمونه‌ای دیگر از اهمیت دیوار برشی فولادی، بیمارستان آلیو ویو در لس‌آنجلس (شکل (۳-۲))، کالیفرنیا است که در سال ۱۹۷۰ با سیستم دیوار برشی بتنی ساخته شد، اما پس از تنها ۱۰ هفته بهره‌برداری و وقوع زلزله نهم فوریه ۱۹۷۱، ساختمان تخریب گردید. این حادثه نشان‌دهنده ضعف سیستم بتنی در برابر زلزله بود و در اوایل دهه ۱۹۸۰، بیمارستان مجدداً با استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی ساخته شد که عملکرد بسیار بهتری در مقابله با نیروهای جانبی داشت. این تجربه‌ها، اهمیت دیوار برشی فولادی را به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز برجسته کرده و نشان می‌دهد که این سیستم نه تنها برای ساختمان‌های بلند بلکه برای پروژه‌های حیاتی مانند بیمارستان‌ها نیز گزینه‌ای مؤثر و مطمئن است. استفاده از دیوار برشی فولادی به مهندسان امکان می‌دهد تا ساختمان‌ها را با مقاومت بالا، کاهش تغییرمکان جانبی و عملکرد لرزه‌ای مطلوب طراحی کنند، و این امر در دهه‌های بعد موجب گسترش سریع کاربرد این فناوری در سطح جهان شد [۷].



شکل ۳-۲، نمونه تیپ دیوار برشی فولادی به کار رفته در بیمارستان آلیو ویو لس‌آنجلس [۷]

۲-۲-۲- مزایا و معایب دیوار برشی فولادی

دیوارهای برشی فولادی دارای مزایای متعددی هستند که آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر بارهای جانبی تبدیل می‌کند. از جمله این مزایا می‌توان به سختی اولیه بالا، شکل‌پذیری مناسب، ظرفیت جذب انرژی لرزه‌ای بالا و رفتار پایدار در بارگذاری‌های چرخه‌ای اشاره کرد. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که دیوارهای برشی فولادی در مناطق زلزله‌خیز عملکرد بهتری نسبت به سایر سیستم‌های مقاوم جانبی داشته باشند [۸]. مزایا و معایب دیوار برشی فولادی در ادامه بصورت مختصر بیان گردیده است:

مزایای دیوار برشی فولادی

وزن کمتر: به دلیل سختی بالای جانبی دیوار برشی فولادی، ابعاد و مقاطع سازه‌ای کاهش می‌یابد و وزن کلی اسکلت سبک‌تر می‌شود که باعث کاهش بار مرده و صرفه‌جویی در مصالح می‌گردد.

عملکرد مؤثر در کنترل تغییر مکان جانبی: سختی نسبی بالای دیوار برشی فولادی باعث کنترل مناسب تغییر مکان جانبی ساختمان در برابر بارهای جانبی می‌شود.

مقاومت زیاد: دیوار برشی فولادی توانایی تحمل نیروهای جانبی و بارهای لرزه‌ای را دارد و به افزایش پایداری سازه کمک می‌کند.

اجرای آسان: فرآیند نصب و اتصال ورق‌های فولادی نسبت به دیوارهای بتنی سریع‌تر و ساده‌تر است و زمان ساخت را کاهش می‌دهد.

کاهش اشغال فضا و افزایش زیربنای مفید: ضخامت دیوارهای فولادی بین ۴ تا ۱۲ میلی‌متر است، در حالی که دیوار برشی بتنی معمولاً بین ۳۲ تا ۶۲ سانتی‌متر ضخامت دارد. این ویژگی موجب افزایش فضای مفید معماری و بهره‌وری اقتصادی می‌شود.

امکان تعبیه بازشوهای در و پنجره: دیوارهای برشی فولادی، در صورت رعایت الزامات سخت کننده، قابلیت ایجاد بازشو در هر ابعادی را دارند، در حالی که در سیستم‌های مهاربندی X و V و دیوارهای بتنی این امکان محدود یا دشوار است.

بهسازی سازه‌های ضعیف: به دلیل شکل‌پذیری بالا، دیوار برشی فولادی گزینه‌ای مناسب برای مقاوم‌سازی و تقویت سازه‌های موجود ضعیف است.

معایب و محدودیت‌های دیوار برشی فولادی

پیچیدگی تأمین الزامات طراحی: رعایت دقیق ضوابط طراحی و اجرای دیوارهای فولادی نیازمند دقت بالاست و ممکن است چالش‌زا باشد.

کنترل تغییر مکان نسبی در ساختمان‌های بلند: در سازه‌های بلند، مدیریت تغییر مکان نسبی بین طبقات نیاز به تدابیر ویژه دارد.

نیاز به تدابیر ویژه برای حرارت و خوردگی: ورق‌های فولادی در برابر آتش و خوردگی نیازمند محافظت و پوشش‌های مناسب هستند که هزینه و پیچیدگی طراحی را افزایش می‌دهد.

۲-۲-۳- عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی فولادی

دیوارهای برشی فولادی به‌عنوان یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی در سازه‌ها شناخته می‌شوند و نقش مهمی در ارتقای ایمنی لرزه‌ای ایفا می‌کنند. این دیوارها با ایجاد میدان کششی قطری در ورق فولادی، مکانیزمی کارآمد برای انتقال برش به اعضای مرزی فراهم می‌سازند. به دلیل شکل‌پذیری بالا و رفتار هیستریزیس پایدار، دیوارهای برشی فولادی قادرند انرژی قابل توجهی را در طول زلزله جذب کنند و از تمرکز تنش در سایر بخش‌های سازه جلوگیری نمایند. این ویژگی موجب کاهش آسیب‌پذیری سازه در برابر زلزله‌های شدید و افزایش دوام عملکردی آن می‌شود. علاوه بر این، استفاده از دیوارهای برشی فولادی به کنترل

تغییر مکان‌های جانبی و کاهش دریافت طبقات کمک می‌کند که در نتیجه آن، خطر تخریب یا آسیب‌های غیرسازه‌ای نیز کمتر می‌شود. طراحی این سیستم‌ها معمولاً به گونه‌ای انجام می‌شود که در عین تأمین مقاومت و سختی لازم، قابلیت تحمل چرخه‌های متعدد بارگذاری را نیز داشته باشند. از دیگر مزایای این دیوارها می‌توان به سرعت اجرا، وزن مناسب، و امکان به کارگیری در سازه‌های جدید یا مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود اشاره کرد. تحقیقات تجربی و عددی متعدد نشان داده‌اند که عملکرد دیوارهای برشی فولادی در مقایسه با برخی سیستم‌های مقاوم دیگر، مطلوب‌تر و اقتصادی‌تر است. به همین دلیل، این سیستم‌ها در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای معتبر جهان جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. در مجموع، استفاده از دیوارهای برشی فولادی راهکاری مؤثر برای افزایش ایمنی، کاهش خسارات و تضمین پایداری سازه‌ها در برابر نیروهای جانبی ناشی از زلزله محسوب می‌شود [۹].

۲-۲-۴- کاربرد دیوار برشی فولادی در سازه‌ها

دیوارهای برشی فولادی به دلیل ویژگی‌های مکانیکی مطلوب، در طیف گسترده‌ای از انواع سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ساختمان‌های بلندمرتبه، این سیستم‌ها معمولاً به عنوان مؤلفه اصلی مقاوم جانبی به کار می‌روند و وظیفه اصلی آن‌ها تحمل و انتقال بارهای ناشی از زلزله و باد به شالوده است. سختی و مقاومت بالای این دیوارها باعث می‌شود که تغییر مکان‌های جانبی در سازه‌های مرتفع به میزان قابل توجهی کنترل شود و در نتیجه پایداری کلی سازه تضمین گردد. در ساختمان‌های صنعتی و تجاری نیز دیوارهای برشی فولادی به عنوان عناصر مقاومتی مکمل استفاده می‌شوند و نقش مهمی در افزایش سختی جانبی و بهبود رفتار دینامیکی سازه ایفا می‌کنند. این موضوع به ویژه در سازه‌هایی که دارای دهانه‌های بزرگ یا سیستم‌های سقف سبک هستند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. علاوه بر سازه‌های جدید، کاربرد این دیوارها در مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود نیز بسیار مؤثر است. افزودن دیوار برشی فولادی به سازه‌های قدیمی می‌تواند ظرفیت باربری جانبی آن‌ها را افزایش داده و عملکرد لرزه‌ای را به طور چشمگیری ارتقا دهد. این روش به دلیل اجرا و نصب سریع، هزینه نسبتاً مناسب و کارایی بالا، یکی از گزینه‌های پرکاربرد در پروژه‌های بازسازی و مقاوم‌سازی به شمار

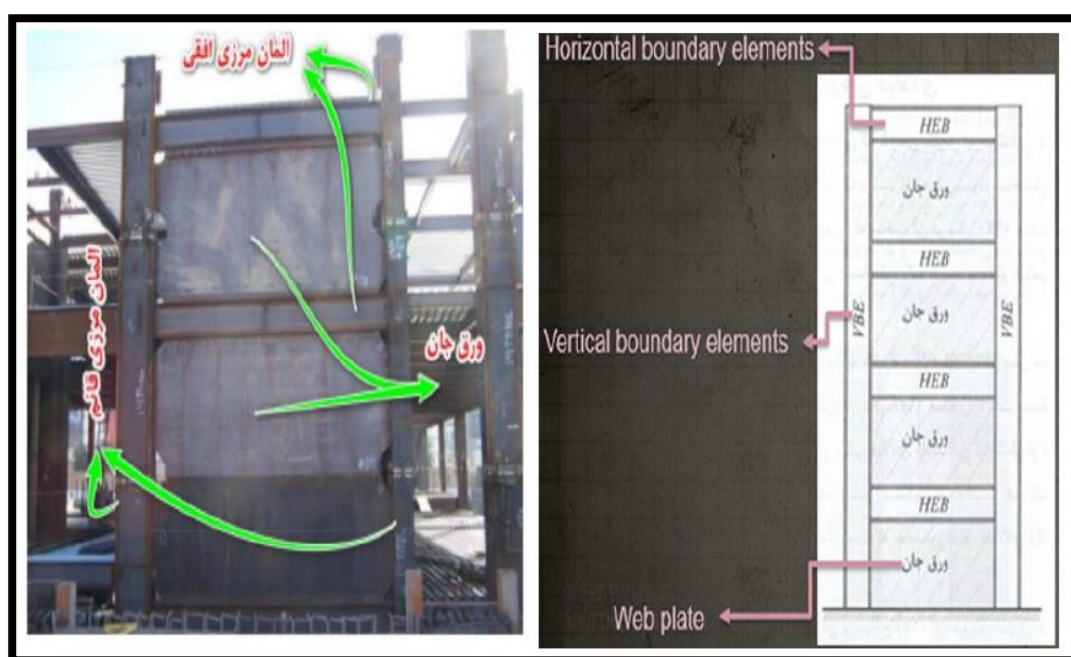
می‌رود. به طور کلی، دیوارهای برشی فولادی به دلیل انعطاف‌پذیری در طراحی و قابلیت انطباق با انواع سازه‌ها، به‌عنوان راهکاری کارآمد برای افزایش ایمنی و پایداری لرزه‌ای ساختمان‌ها شناخته می‌شوند [۵].

۲-۲-۵- ساختار و عملکرد دیوار برشی فولادی

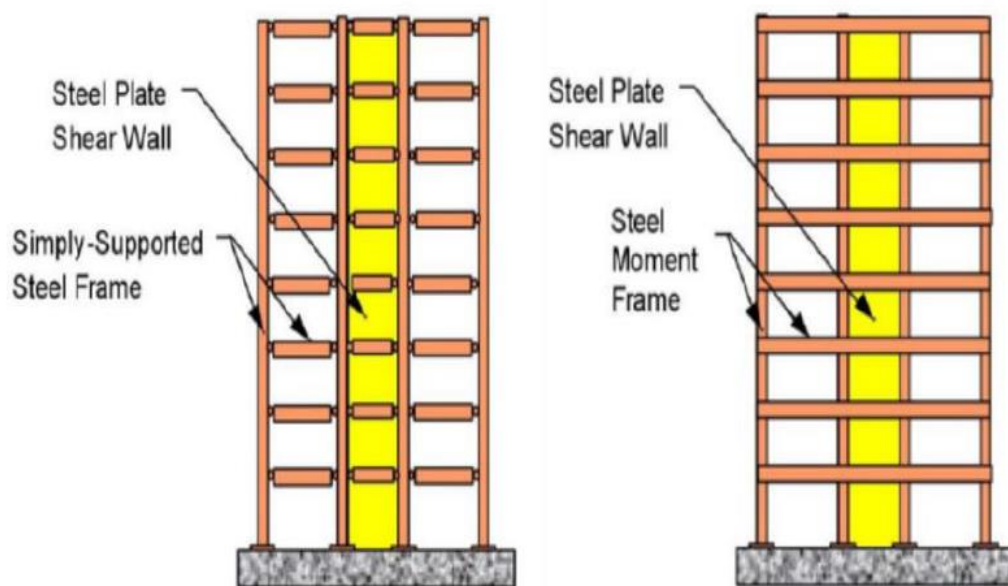
پانل دیوار برشی فولادی از اجزای اصلی مختلفی تشکیل می‌شود که هر یک نقش مشخصی در انتقال نیروها و تأمین سختی جانبی سازه بر عهده دارند. این پانل معمولاً شامل یک ورق فولادی نازک با ضخامت حدود ۲ تا ۱۰ میلی‌متر است که به‌عنوان عنصر اصلی مقاوم در برابر بارهای جانبی عمل می‌کند. این ورق فولادی توسط تیرها در بالا و پایین و ستون‌ها در طرفین مهار می‌شود و این اعضا به‌طور کلی تحت عنوان «اعضای مرزی» شناخته می‌شوند. اعضای قائم مرزی که همان ستون‌ها هستند، در مراجع معتبر با عنوان Vertical Boundary Elements معرفی می‌شوند و وظیفه اصلی آن‌ها تحمل و انتقال نیروهای محوری و لنگرهای ناشی از عملکرد ورق برشی است. اعضای افقی مرزی که همان تیرها می‌باشند، در ادبیات فنی با عنوان Horizontal Boundary Elements نامیده می‌شوند و نقش مهمی در مهار ورق فولادی و انتقال نیروها به ستون‌ها دارند. در میان این اعضا، ورق فولادی عمودی که بین تیرها و ستون‌ها قرار می‌گیرد و وظیفه اصلی آن تشکیل میدان کششی و جذب نیروهای برشی است، به نام Web Plate یا «ورق جان» شناخته می‌شود. هماهنگی عملکرد این سه جزء یعنی ستون‌ها، تیرها و ورق فولادی جان، موجب شکل‌گیری یک سیستم یکپارچه مقاوم می‌گردد که توانایی بالایی در جذب انرژی و کنترل تغییرمکان‌های جانبی دارد. در طراحی مهندسی، شناخت دقیق این اجزا و نحوه تعامل آن‌ها برای تضمین عملکرد مطلوب دیوار برشی فولادی تحت بارهای لرزه‌ای و جانبی اهمیت ویژه‌ای دارد [۷].

در سیستم دیوار برشی فولادی، نوع اتصال بین تیر و ستون یکی از عوامل تعیین‌کننده در رفتار لرزه‌ای و عملکرد کلی سازه است. این اتصالات می‌توانند به دو صورت ساده (مفصلی) یا صلب (گیردار) طراحی شوند که انتخاب آن‌ها وابسته به سطح لرزه‌خیزی منطقه و الزامات آیین‌نامه‌ای می‌باشد. در مناطقی با لرزه‌خیزی کم، امکان استفاده از قاب ساده ساختمانی همراه با دیوار برشی فولادی وجود دارد و در این حالت، اتصالات

تیرهای داخلی قاب می‌توانند به صورت مفصلی در نظر گرفته شوند. این رویکرد هزینه‌های اجرایی را کاهش داده و در عین حال سختی جانبی لازم توسط ورق فولادی جان تأمین می‌گردد. اما در مناطق با لرزه‌خیزی بالا، آیین‌نامه‌ها الزام می‌کنند که اتصالات تیر به ستون در قاب دیوار برشی فولادی به صورت صلب طراحی شوند تا پایداری و ظرفیت جذب انرژی سیستم تضمین گردد. علاوه بر این، ورق فولادی جان می‌تواند بسته به شرایط طراحی و اجرا توسط جوش یا پیچ به قاب مرزی متصل شود. اتصال گیردار تیر به ستون سبب می‌شود پتانسیل تشکیل مفصل پلاستیک در دو انتهای تیر افزایش یابد که این پدیده در واقع یک مکانیزم مطلوب برای استهلاک انرژی ناشی از زلزله محسوب می‌شود. بدین ترتیب، انتخاب نوع اتصال در این سیستم نه تنها بر سختی و مقاومت تأثیر دارد بلکه نقش مهمی در کنترل تغییر شکل‌ها و افزایش شکل‌پذیری کل سازه ایفا می‌کند [۱۰].

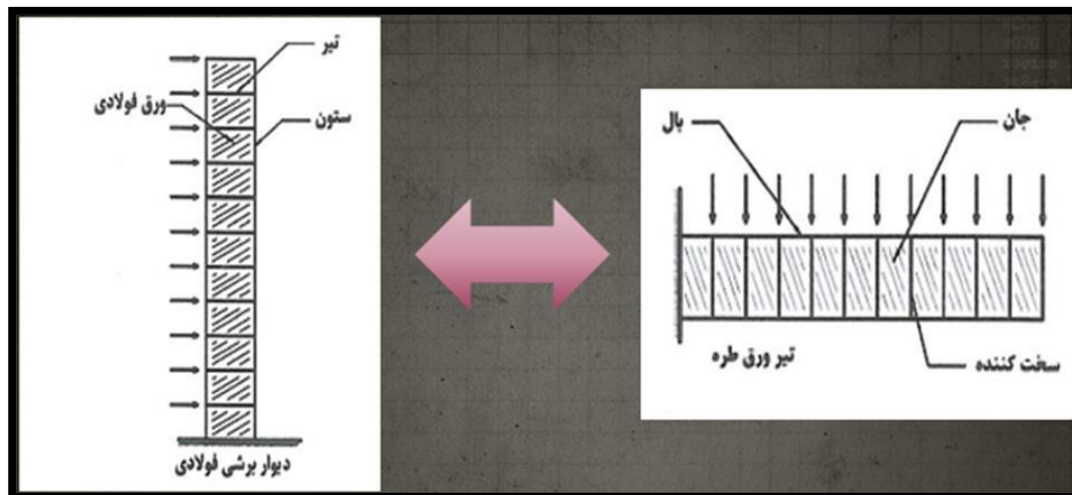


شکل ۲-۴، اعضای سیستم دیوار برشی فولادی [۷ و ۱۰]



شکل ۲-۵، اتصال گیردار (سمت راست) و مفصلی (سمت چپ) [۶]

دیوار برشی فولادی را می‌توان از دیدگاه مکانیکی مشابه یک تیر ورق فولادی تصور کرد. در این تشبیه، ستون‌های اطراف دیوار نقش بال‌های تیروورق را بر عهده دارند که بارهای محوری ناشی از میدان کششی ورق را تحمل می‌کنند. تیرهای افقی بالا و پایین نیز مانند سخت‌کننده‌های تیروورق عمل کرده و وظیفه مهار ورق فولادی و انتقال نیروها به ستون‌ها را بر دوش دارند. در این میان، ورق فولادی جانبی که بین تیرها و ستون‌ها قرار گرفته است، معادل جان تیروورق محسوب می‌شود و وظیفه اصلی آن انتقال برش و ایجاد میدان کششی قطری برای مقاومت در برابر بارهای جانبی است. این مدل‌سازی ذهنی کمک می‌کند تا رفتار دیوار برشی فولادی بهتر درک شده و تعامل اجزای آن مشابه رفتار تیروورق تحت بارهای برشی تحلیل شود. همچنین، این تشبیه نشان می‌دهد که همانند تیروورق‌های فولادی، طراحی صحیح اعضای مرزی و اتصال مناسب آن‌ها به ورق جان، نقش کلیدی در عملکرد بهینه دیوار برشی فولادی دارد (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۶، مشابهت دیوار برشی فولادی و تیرور فولادی [۷]

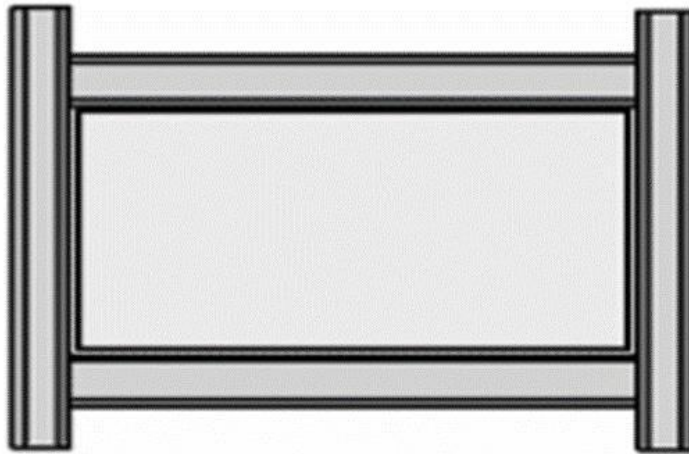
۲-۲-۶- انواع دیوار برشی فولادی

دیوارهای برشی فولادی بر اساس نحوه استفاده از سخت کننده‌ها به دو نوع اصلی تقسیم می‌شوند. در دیوار برشی فولادی سخت شده (Stiffened Steel Shear Wall)، ورق فولادی با سخت کننده‌های عمودی یا افقی تقویت می‌شود تا کمانش موضعی به تأخیر افتاده و ظرفیت باربری افزایش یابد. این نوع معمولاً در سازه‌های بلند یا مناطق با لرزه‌خیزی بالا کاربرد دارد. در مقابل، دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده (Unstiffened Steel Shear Wall) تنها شامل ورق فولادی جان است که پس از کمانش اولیه، یک میدان کششی قطری ایجاد کرده و بارهای جانبی را منتقل می‌کند. این سیستم ساده‌تر، اقتصادی‌تر و با سرعت اجرایی بالاتر است. انتخاب هر یک از این دو نوع وابسته به شرایط سازه، سطح لرزه‌خیزی منطقه و الزامات آیین‌نامه‌ای می‌باشد [۱۰]. انواع این دیوارها در ادامه تشریح گردیده است.

۲-۲-۶-۱- جدار نازک (سخت نشده)

در دیوارهای برشی فولادی بدون سخت کننده، ورق جان به دلیل ضخامت کم و مقاومت فشاری ناچیز، به سرعت در برابر بارهای کوچک دچار کمانش موضعی می‌شود. این کمانش در نگاه اول می‌تواند به عنوان یک ضعف تلقی شود، اما در واقع آغاز یک مکانیزم مقاومتی مهم است. پس از کمانش اولیه، ورق جان وارد مرحله

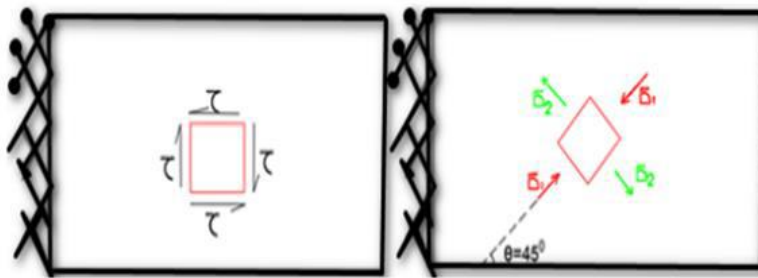
عملکرد کششی می‌شود و یک میدان کششی قطری در آن شکل می‌گیرد که بخش عمده بارهای جانبی را تحمل می‌کند. این میدان کششی رفتاری مشابه میدان کششی ایجادشده در جان تیروورق دارد و باعث می‌شود ورق بتواند با کارایی بالا نیروهای برشی را منتقل کند. به عبارت دیگر، سیستم از یک وضعیت فشاری ضعیف به یک مکانیزم کششی پایدار تغییر ماهیت می‌دهد. در این شرایط، اعضای مرزی شامل ستون‌ها و تیرها نقش حیاتی در نگهداری و هدایت ورق جان ایفا می‌کنند. این اعضا با مهار کردن لبه‌های ورق، شرایط لازم برای ایجاد میدان کششی پایدار را فراهم می‌آورند. همچنین، اعضای مرزی اجازه می‌دهند ورق جان تا رسیدن به تنش تسلیم خود پیشروی کرده و انرژی قابل توجهی را در طی بارگذاری‌های چرخه‌ای جذب کند. در نتیجه، این نوع دیوار نه تنها تغییر مکان‌های جانبی سازه را کنترل می‌کند بلکه ظرفیت بالایی برای استهلاک انرژی در برابر زلزله از خود نشان می‌دهد. بدین ترتیب، وجود میدان کششی قطری، اساس عملکرد مطلوب دیوار برشی فولادی را تشکیل می‌دهد (شکل (۷-۲)).



شکل ۷-۲، دیوار برشی فولادی جدارنازک [۱۰]

در دیوارهای برشی فولادی، تحت اثر بارهای جانبی، ورق جان در ابتدا دچار تنش‌های برشی می‌شود. بر اساس معیار فون میزس، این تنش‌های برشی به تنش‌های کششی و فشاری مورب با زاویه تقریبی ۴۵ درجه نسبت به محورهای اصلی تبدیل می‌گردند (شکل (۸-۲)). از آنجا که مقاومت فولاد در کشش به مراتب بیشتر

از مقاومت آن در فشار است، بخش تحت فشار ورق به سرعت کمانش کرده و حالت چروکیده به خود می‌گیرد. در مقابل، بخش کششی ورق به‌عنوان مسیر اصلی انتقال نیرو عمل کرده و ظرفیت باربری جانبی سیستم را تأمین می‌کند. این پدیده نشان می‌دهد که حتی پس از وقوع کمانش اولیه، عملکرد ورق جان متوقف نمی‌شود بلکه وارد فاز جدیدی از تحمل بار به صورت کششی می‌گردد (شکل (۲-۹)).



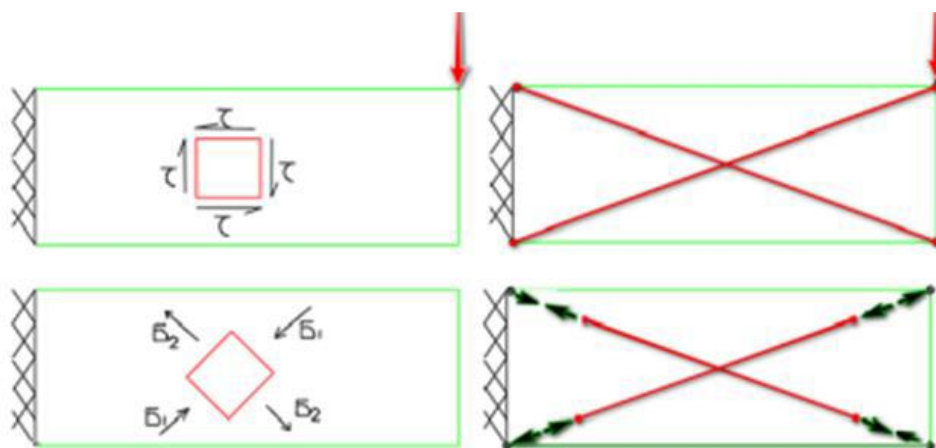
شکل ۲-۸، تبدیل تنش برشی خالص به تنش‌های کششی و فشاری [۱۰]



شکل ۲-۹، نمونه از ورق کمانش کرده و چروکیده شده

برای درک بهتر این موضوع، می‌توان جان دیوار را مشابه یک مهاربند ضربدری فرض کرد. بخش‌هایی از جان که تحت فشار قرار دارند مانند یک عضو مهاربندی فشاری عمل کرده و در اثر بارگذاری دچار کمانش می‌شوند. در مقابل، بخش‌های کششی جان همچون عضو کششی مهاربندی باقی می‌مانند و بار جانبی را به‌طور کامل منتقل می‌کنند (شکل ۲-۱۰)). این مکانیزم موجب می‌شود که ظرفیت باربری سازه با وجود کمانش موضعی در بخش‌هایی از ورق، همچنان حفظ شود. در حقیقت، با افزایش بار، سهم عضو کششی در انتقال نیرو بیشتر می‌شود و این امر به ایجاد یک میدان کششی پایدار در ورق جان می‌انجامد. این رفتار خاص همان چیزی است که از آن به‌عنوان پدیده پس‌کمانش یاد می‌شود.

یکی از ویژگی‌های جالب پدیده پس‌کمانش، افزایش ظرفیت باربری ورق پس از وقوع کمانش اولیه است. تحقیقات نشان داده‌اند که مقاومت پس‌کمانشی ورق‌ها می‌تواند تا چندین برابر بیشتر از مقاومت پیش‌کمانشی باشد، زیرا ایجاد میدان کششی باعث بسیج کامل ظرفیت کششی فولاد می‌شود. این ویژگی در دیوارهای برشی فولادی نیز کاملاً صادق است و عملکرد لرزه‌ای مطلوب آن‌ها را تضمین می‌کند. با این حال، در شرایطی که ورق جان به‌تنهایی پاسخگوی نیازهای طراحی نباشد، از ورق‌های سخت‌کننده یا تقویت‌کننده استفاده می‌شود تا از بروز کمانش زودرس جلوگیری کرده و میدان کششی با پایداری و ظرفیت بالاتری شکل گیرد. به این ترتیب، ترکیب مقاومت کششی فولاد با پدیده پس‌کمانش یکی از مهم‌ترین عوامل برتری دیوارهای برشی فولادی در برابر بارهای جانبی محسوب می‌شود.

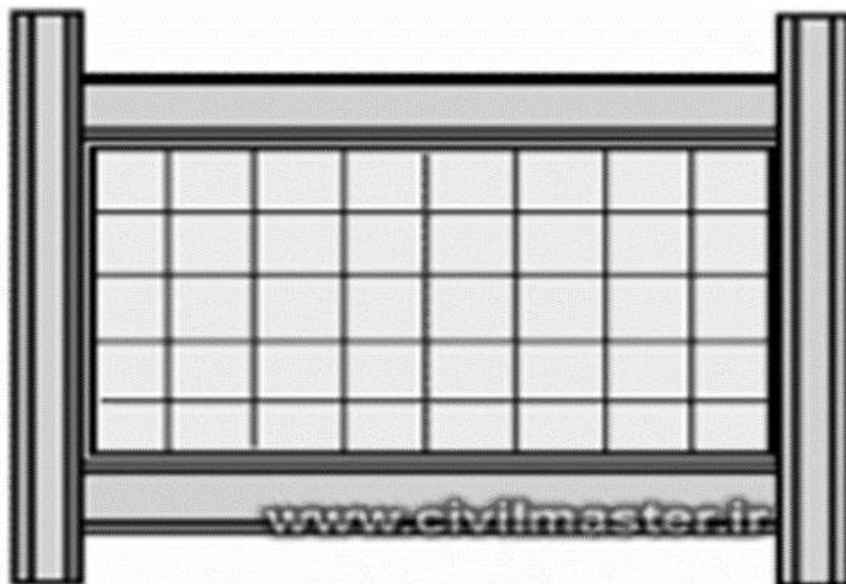


شکل ۲-۱۰، تشابه عملکرد عضو مهاربندی با ورق فولادی تحت اثر تنش‌های کششی و فشاری [۱۰]

۲-۲-۶-۲- سخت شده (افقی و قائم)

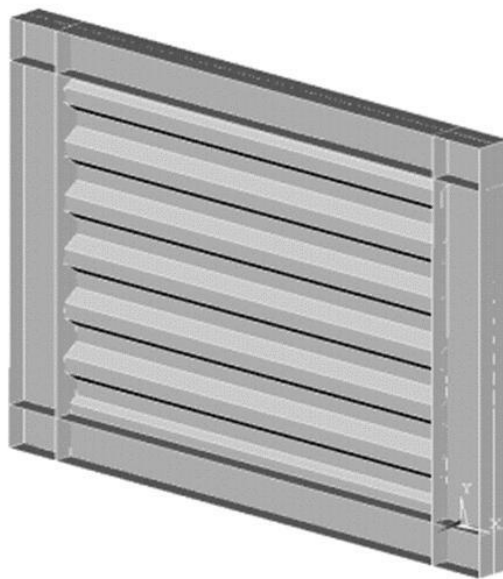
برای جلوگیری از کمانش ورق جان در دیوارهای برشی فولادی و افزایش مقاومت آن، دو راهکار کلی وجود دارد. نخست افزایش ضخامت ورق است که اگرچه می‌تواند ظرفیت کمانشی و برشی ورق را بالا ببرد، اما در عمل اغلب از نظر اقتصادی به‌صرفه نیست. راهکار دوم استفاده از سخت‌کننده‌های قائم و افقی است که وظیفه آن‌ها ممانعت از کمانش زود هنگام ورق و کنترل تغییرشکل‌های موضعی است. سخت‌کننده‌ها ممکن است به‌صورت کامل طراحی شوند تا ورق جان بتواند مقاومت تسلیم برشی خود را به‌طور کامل بروز دهد، یا

به صورت جزئی باشند که در این حالت عملکرد دیوار ترکیبی از مقاومت کمانشی و میدان کششی خواهد بود
(شکل (۱۱-۲)).



شکل ۱۱-۲، دیوار برشی فولادی سخت شده [۱۰]

مقاومت ورق جان اهمیت بسیار زیادی دارد، زیرا سهم اصلی در استهلاک انرژی لرزه‌ای بر عهده این بخش است. اگر ورق جان ضعیف طراحی شود، به سرعت وارد ناحیه پلاستیک می‌شود اما همین موضوع باعث می‌شود ستون‌ها از ورود به ناحیه پلاستیک محافظت شوند و کل ظرفیت ورق جان برای جذب انرژی به کار گرفته شود. در برخی طرح‌ها، برای افزایش سختی بدون افزایش ضخامت، از ورق‌های موج‌دار استفاده می‌شود. این ورق‌ها به دلیل شکل هندسی خاص خود سختی بیشتری نسبت به ورق‌های صاف دارند و از نظر عملکرد سازه‌ای در دسته دیوارهای برشی سخت‌شده طبقه‌بندی می‌شوند (شکل (۱۲-۲)).

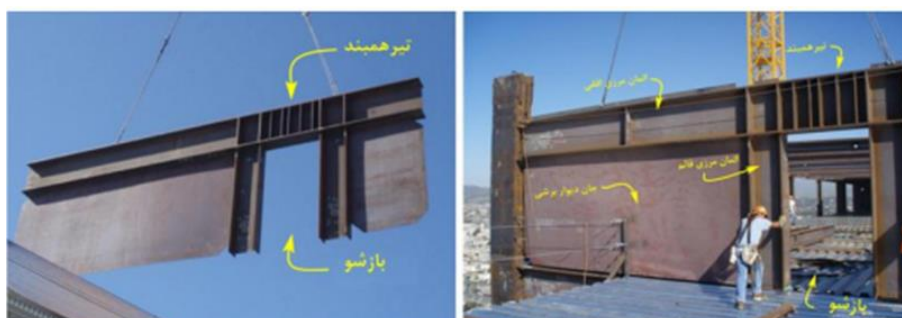


شکل ۲-۱۲، دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار [۱۰]

در بعضی موارد، ورق جان آن‌قدر ضعیف طراحی می‌شود که تولید آن از نظر صنعتی امکان‌پذیر نیست. در چنین شرایطی می‌توان از ورق‌های موجود استفاده کرد و با ایجاد حفره‌هایی منظم در سطح آن، ظرفیت موثر ورق را کاهش داد؛ این سیستم به‌عنوان دیوار برشی حفره‌دار شناخته می‌شود (شکل ۲-۱۳). در صورت وجود بازشو در دیوار برشی، تمرکز تنش در اطراف بازشوها ایجاد می‌شود و به همین دلیل باید از سخت‌کننده‌های موضعی در اطراف بازشو استفاده کرد. راهکار دیگر استفاده از دیوار برشی کوپله است؛ در این روش دو دیوار برشی مجزا در دو دهانه اجرا می‌شوند و به وسیله تیر همبند به هم متصل می‌گردند. این اتصال سبب هماهنگی عملکرد دو دیوار شده و ظرفیت و سختی کلی سیستم به شکل محسوسی افزایش می‌یابد (شکل ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۳، دیوار برشی حفره‌دار [۱۰]

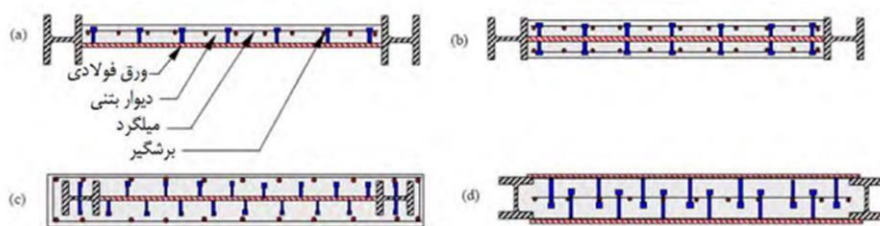


شکل ۲-۱۴، نمونه‌ای از دیوار برشی کوپله و استفاده از سخت‌کننده در اطراف بازشو [۱۰]

۲-۲-۶-۳- دیوار برشی فولادی مرکب (کامپوزیت)

عملکرد دیوارهای برشی فولادی را می‌توان با استفاده از سیستم‌های کامپوزیت فولاد - بتن به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشید. در این روش، ورق فولادی جان با لایه‌ای از بتن ترکیب می‌شود تا سختی و مقاومت کلی دیوار افزایش یابد و بارهای جانبی بهتر تحمل شوند. بتن علاوه بر مشارکت در مقاومت برشی، نقش مهمی در مهار ورق فولادی و جلوگیری از کمانش موضعی آن ایفا می‌کند و با تأمین برش‌گیرها در فواصل مناسب، رفتار یکپارچه بین فولاد و بتن ایجاد می‌شود. این یکپارچگی موجب می‌شود ورق فولادی بتواند تا رسیدن به تنش تسلیم کششی خود فعال بماند و انرژی لرزه‌ای بیشتری مستهلک شود. بتن می‌تواند به‌صورت درجا یا

پیش‌ساخته مورد استفاده قرار گیرد و استفاده از آن ضمن افزایش ظرفیت و سختی، به کاهش ضخامت ورق فولادی و صرفه‌جویی در فولاد منجر می‌شود. همچنین، این سیستم باعث کاهش تغییر مکان‌های جانبی، کنترل ترک‌خوردگی و ارتقای عملکرد لرزه‌ای سازه می‌گردد و به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای افزایش ایمنی و دوام ساختمان‌ها در مناطق لرزه‌خیز شناخته می‌شود که در شکل (۲-۱۵) جزئیات این نوع دیوار نشان داده شده است.

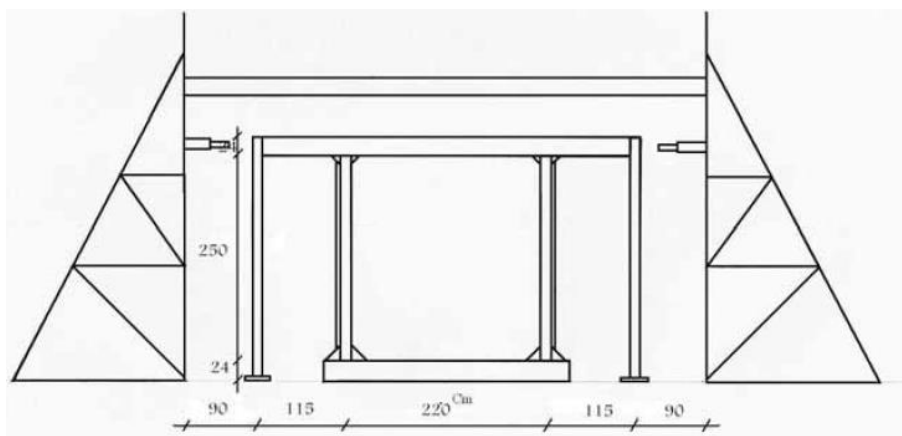


شکل ۲-۱۵، جزئیات دیوار برشی کامپوزیت [۱۰]

۲-۳-۲- پیشینه تحقیق

۲-۳-۱- مدل‌های آزمایشگاهی محرمی و حبیب‌نژاد

محرمی و حبیب‌نژاد در سال ۱۳۸۷ به بررسی مزایای استفاده از دیوار برشی فولادی جدار نازک برای مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی پرداختند. در این مطالعه، عملکرد و رفتار یک قاب یک طبقه تقویت‌شده با دیوار برشی فولادی جدار نازک به‌صورت نیمه‌مقید مورد تحلیل قرار گرفت. برای این منظور، آزمایش‌های دوره‌ای بارگذاری بر روی یک قاب خمشی بدون دیوار برشی انجام شد و سپس با اضافه کردن یک دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید و حفظ مشخصات اعضای مرزی و ستون‌های نگهدارنده ورق، دو نمونه دیگر مورد آزمایش قرار گرفتند. تفاوت این دو نمونه تنها در صلبیت خمشی ستون‌های نگهدارنده ورق بود که تأثیر آن بر رفتار دیوار برشی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۲-۱۶) هندسه نمونه‌های آزمایش‌شده را نشان می‌دهد [۱۱].



شکل ۲-۱۶، مدل ترکیبی نمونه‌های مورد مطالعه توسط محرمی و همکاران [۱۱]

برای بررسی اثر صلبیت ستون‌های مرزی، دو نمونه با ستون‌های 2UNP160 و 2UNP120 طراحی و آزمایش شدند. هر دو نمونه دارای ورق فولادی، تیر و ستون‌های قاب پیرامونی با مشخصات یکسان بودند و تنها تفاوت میان آن‌ها در ابعاد و صلبیت ستون‌های نگهدارنده ورق جان بود. جدول (۲-۱) مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی و جدول (۲-۲) ویژگی‌های ستون‌های فرعی متصل به ورق را ارائه می‌دهند. این طراحی امکان مقایسه مستقیم رفتار دیوار برشی نیمه‌مقید با تغییر صلبیت ستون‌ها را فراهم کرد و نقش اعضای مرزی در بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم به صورت دقیق مورد ارزیابی قرار گرفت.

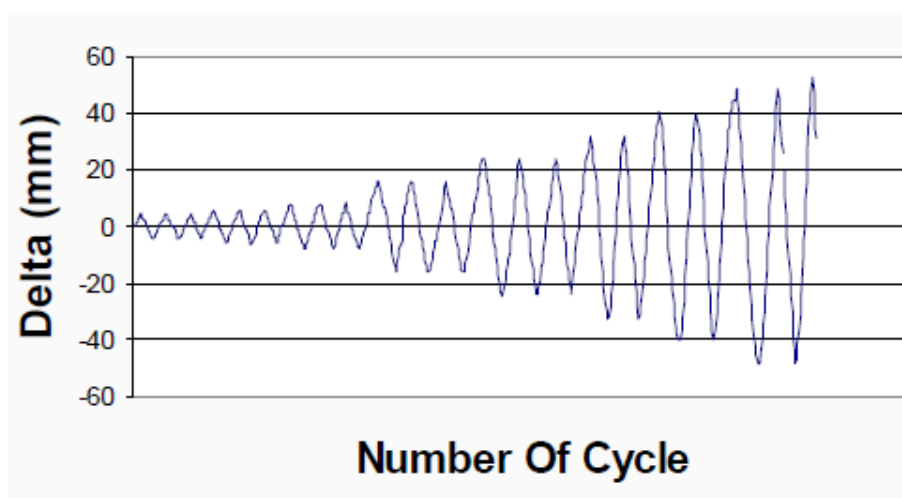
جدول ۲-۱، مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی محرمی و همکاران [۱۱]

| تعداد دهانه | تعداد طبقه | ضخامت ورق (mm) | ستون دیوار برشی | ستون قاب پیرامونی | تیر | عرض دهانه (Cm) | ارتفاع طبقه (Cm) | نمونه |
|-------------|------------|----------------|-----------------|-------------------|--------|----------------|------------------|-------|
| ۱ | ۱ | ۲ | 2UNP160 | 2IPE160 | IPE240 | ۲۲۰ | ۲۷۴ | اول |
| ۱ | ۱ | ۲ | 2UNP120 | 2IPE160 | IPE240 | ۲۲۰ | ۲۷۴ | دوم |

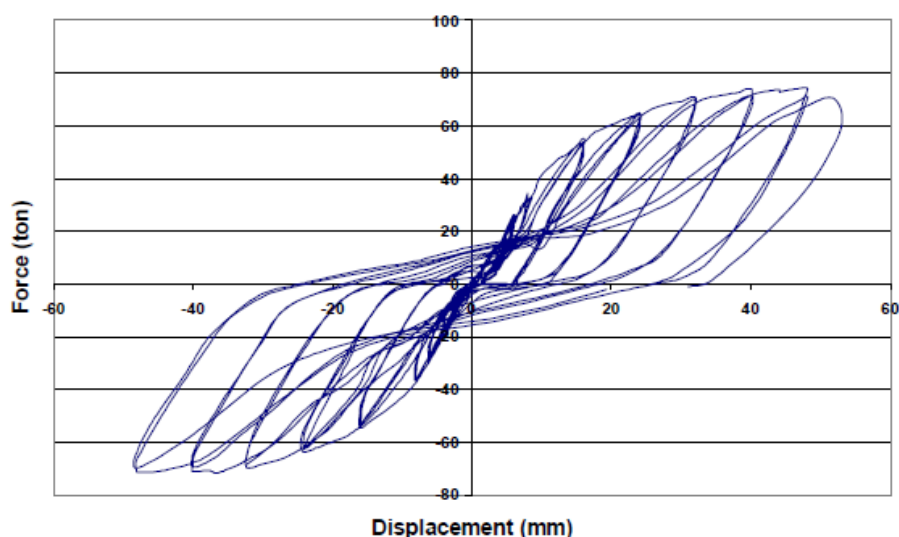
جدول ۲-۲، مشخصات ستون‌های فرعی متصل به ورق در تحقیق محرمی و همکاران [۱۱]

| نمونه دوم | نمونه اول | نمونه | |
|----------------------|----------------------|-----------------|---------------------------------------|
| 2UNP120 | 2UNP160 | نیم‌رخ ستون‌ها | |
| ۳۴ | ۴۸ | cm ² | A سطح مقطع ستون‌ها |
| $1267/43 \times 106$ | $2547/17 \times 106$ | Cm ⁴ | (EI) _{min} سختی خمشی ستون‌ها |
| $1528/8 \times 106$ | 3885×106 | Cm ⁴ | (EI) _{max} سختی خمشی ستون‌ها |

در این تحقیق، آن‌ها از بارگذاری رفت و برگشتی برای ارزیابی رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده کردند. شکل (۲-۱۷) سیکل‌های بارگذاری نمونه با ستون‌های 2UNP160 و تغییر مکان‌های متناظر آن را نشان می‌دهد، و در شکل (۲-۱۸) منحنی هیستریزیس همین نمونه ارائه شده است. نمونه تا تغییر مکان ۵۲/۸ میلی‌متر و در ۲۲ سیکل تحت بارگذاری قرار گرفت. رفتار نمونه تا تغییر مکان جانبی حدود ۸ میلی‌متر (معادل بار ۳۴ تن) خطی بود و پس از آن، نمونه وارد مرحله غیرخطی شد.



شکل ۲-۱۷، سیکل‌های بارگذاری نمونه با ستون‌های 2UNP160 در تحقیق محرمی و همکاران [۱۱]



شکل ۲-۱۸، منحنی هیستریزیس قاب تقویت‌شده به‌وسیله دیوار برشی با ستون‌های 2UNP160 در تحقیق محرمی و

همکاران [۴]

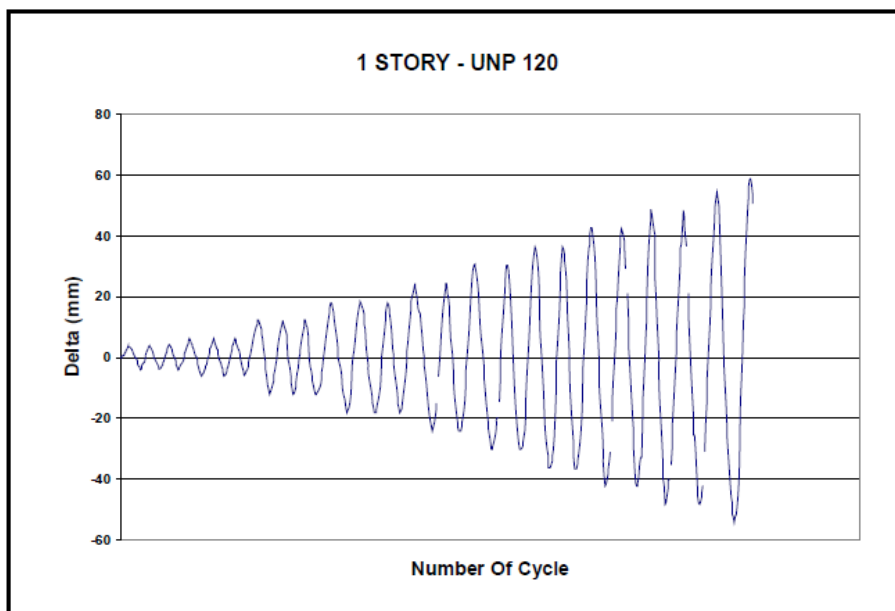
در سیکل بیست و دوم، کمانش تیر به حدی افزایش یافت که باعث گسیختگی یکی از میل‌مهارها شد و ادامه بارگذاری متوقف گردید. شکل (۱۹-۲) کمانش ورق این نمونه را در سیکل هجدهم نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهند که تا قبل از رسیدن به کمانش شدید، ورق فولادی قادر به تحمل بارهای جانبی بوده و رفتار غیرخطی آن با تشکیل میدان کششی و پس‌کمانش قابل مشاهده است. همچنین، مشاهده منحنی هیستریزیس نشان‌دهنده ظرفیت جذب انرژی قابل توجه و رفتار مناسب لرزه‌ای دیوار برشی نیمه‌مقید می‌باشد.



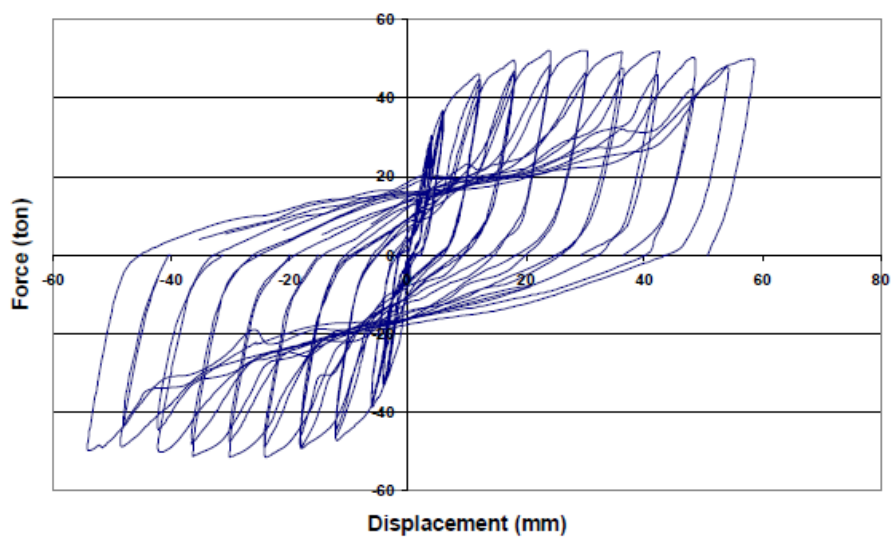
شکل ۱۹-۲، کمانش ورق در سیکل هجدهم در نمونه با ستون‌های 2UNP160 [۱۱]

برای نمونه دارای ستون‌های 2UNP120 نیز بارگذاری چرخه‌ای انجام شد. شکل (۲۰-۲) سیکل‌های بارگذاری این نمونه و تغییر مکان‌های متناظر آن را نشان می‌دهد، و در شکل (۲۱-۲) منحنی هیستریزیس نمونه ارائه شده است. این نمونه تا تغییر مکان ۵۸/۲۲ میلی‌متر و در ۲۲ سیکل تحت بارگذاری قرار گرفت. رفتار نمونه تا تغییر مکان جانبی حدود ۶ میلی‌متر (معادل بار ۳۶ تن) خطی بود و پس از آن وارد مرحله غیرخطی شد. در محدوده سیکل‌های ۱۶ تا ۱۸ و تغییر مکان‌های ۳۵ تا ۴۲ میلی‌متر، ورق دیوار دچار گسیختگی شد (شکل (۲۲-۲)) و ظرفیت باربری دیوار کاهش قابل توجهی یافت. این افت باربری در نمودار هیستریزیس شکل (۲۱-۲) نیز به وضوح مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که صلبیت کمتر ستون‌های

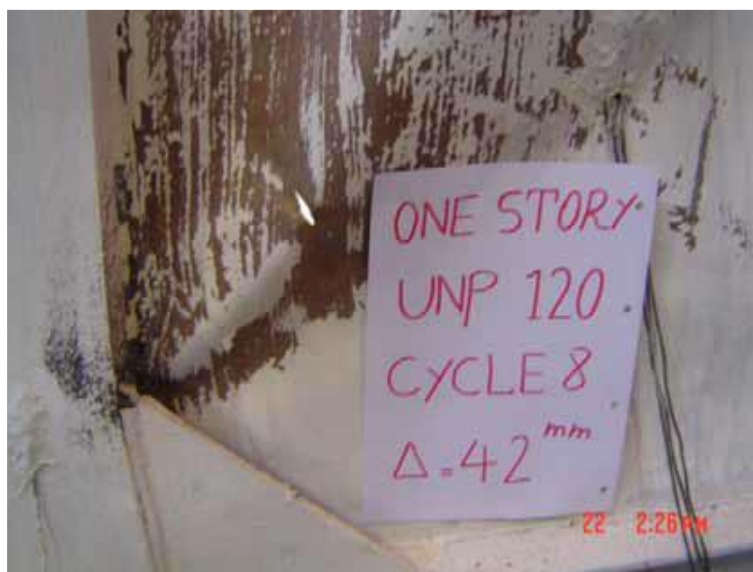
نگهدارنده ورق، منجر به کاهش مقاومت و ظرفیت جذب انرژی دیوار برشی می‌شود و رفتار غیرخطی و گسیختگی زودتر در نمونه با ستون‌های 2UNP120 رخ می‌دهد.



شکل ۲-۲۰، سیکل‌های بارگذاری نمونه با ستون‌های 2UNP120 در تحقیق محرمی و همکاران [۱۱]



شکل ۲-۲۱، منحنی هیستریزیس دیوار برشی فولادی با ستون‌های 2UNP120 در تحقیق محرمی و همکاران [۱۱]



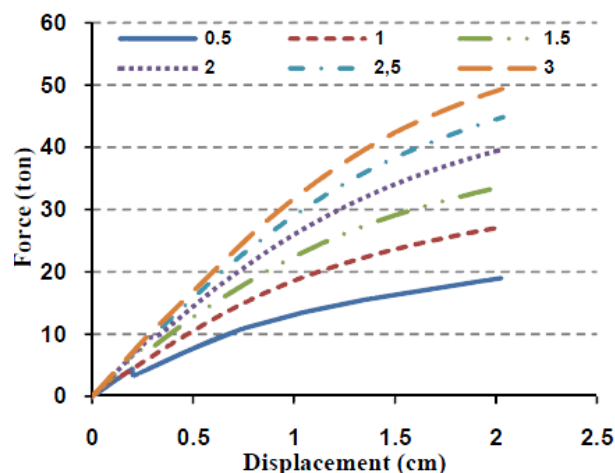
شکل ۲-۲۲، گسیختگی ورق در نمونه با ستون‌های 2UNP120 در تحقیق محرمی و همکاران [۱۱]

نتایج این تحقیق نشان داد نمونه با ستون‌های فرعی بزرگ‌تر (2UNP160) مقاومت بالاتری برابر با ۷۴ تن داشت، در حالی که نمونه با ستون‌های 2UNP120 مقاومت ۵۲ تنی را نشان داد و قاب خمشی بدون دیوار تنها ۲ تن ظرفیت داشت. این مقایسه بیانگر ظرفیت فوق‌العاده دیوار برشی فولادی در مقایسه با قاب خمشی است. آزمایش‌ها همچنین نشان داد تیرهای قاب سازه اولیه بین ورق و ستون‌های مجاور به صورت تیر رابط عمل کرده و بخشی از انرژی وارد شده را مستهلک می‌کنند. بنابراین، در شرایطی که هدف اصلی افزایش ظرفیت باربری باشد، استفاده از ستون‌های نگهدارنده صلب برای دیوار برشی نسبت به ستون‌های انعطاف‌پذیر ارجح است.

۲-۳-۲- مدل‌های تحلیلی سادات خلردی و برخورداری

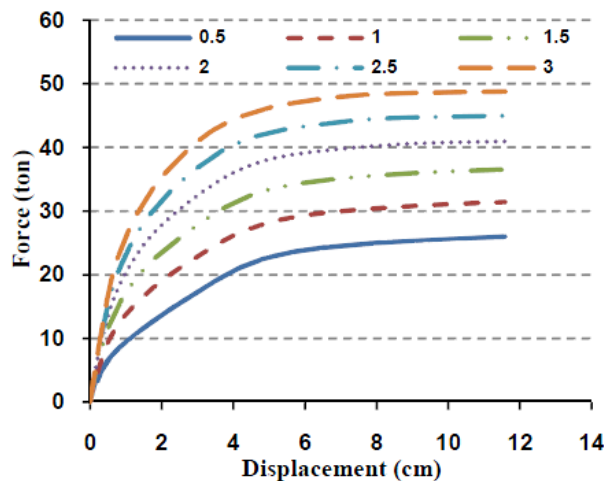
سادات خلردی و برخورداری در سال ۱۳۹۳ تأثیر فولاد نرم و تغییر ضخامت ورق را بر رفتار پس‌کمانشی و مقاومت نهایی دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ابتدا نمونه آزمایشگاهی محرمی و همکار را برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار دادند و سپس با تغییر ضخامت و تنش تسلیم ورق پرنکنده، اثر این پارامترها بر ظرفیت نمونه را تحلیل کردند. برای ورق‌های با تنش ثابت، مقادیر ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد و شش ضخامت متفاوت شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ میلی‌متر انتخاب گردید.

مقاومت نمونه‌ها در این ترکیبات بررسی شد و نتایج در اشکال (۲-۲۳) و (۲-۲۴) برای ورق‌های با تنش ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال ارائه شده است. تحلیل‌ها نشان داد با افزایش ضخامت ورق، مقاومت سیستم به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، در این نمونه‌ها انتقال رفتار از خطی به غیرخطی چندان واضح مشاهده نشده و ورق‌ها عملکرد نسبتاً یکنواختی در مراحل اولیه بارگذاری داشتند.



شکل ۲-۲۳، تأثیر ضخامت ورق با تنش تسلیم ۲۰۰ مگا پاسکال بر مقاومت سیستم در تحقیق سادات خلردی و

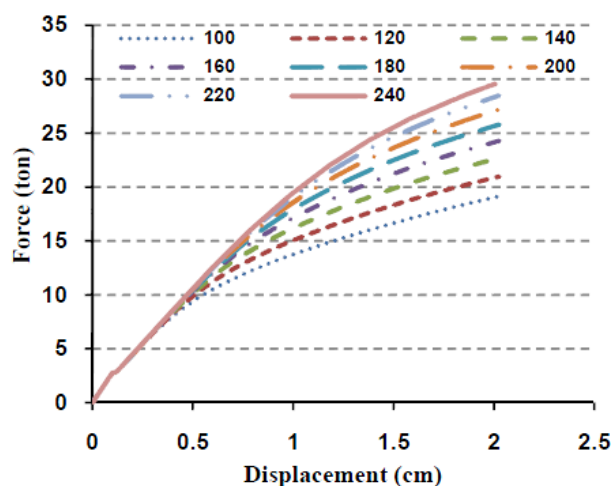
برخورداری [۱۲]



شکل ۲-۲۴، تأثیر ضخامت ورق با تنش تسلیم ۱۰۰ مگا پاسکال بر مقاومت سیستم در تحقیق سادات خلردی و

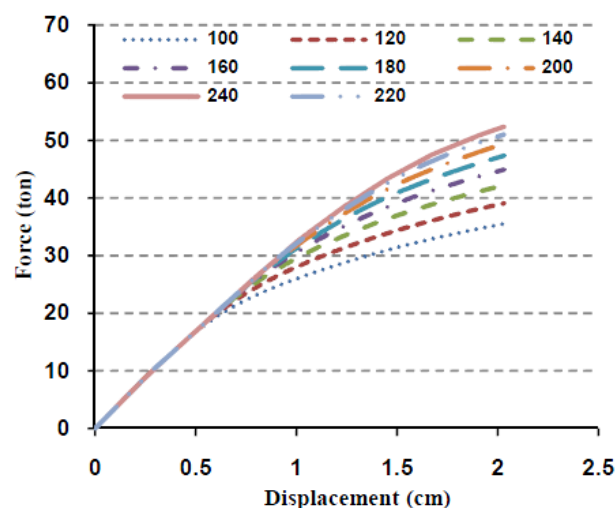
برخورداری [۱۲]

همانطور که مشاهده شد، با افزایش ضخامت ورق در تنش ثابت، مقاومت دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد و سختی اولیه نمونه‌ها نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای بررسی اثر تغییر تنش تسلیم ورق جان با ضخامت ثابت، دو مجموعه نمونه با ضخامت‌های ۱ و ۲ میلی‌متر انتخاب شدند. این نمونه‌ها با مقادیر تنش تسلیم ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰، ۲۰۰، ۲۲۰ و ۲۴۰ مگاپاسکال مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج این آزمایش‌ها در اشکال (۲-۲۵) و (۲-۲۶) به‌صورت منحنی‌های پوش آور ارائه شده است. تحلیل‌ها نشان داد که افزایش تنش تسلیم نیز موجب ارتقای مقاومت نهایی سیستم شده و رفتار پس‌کمانشی ورق‌ها را بهبود می‌بخشد. بدین ترتیب، هم ضخامت و هم تنش تسلیم ورق از عوامل کلیدی در تعیین ظرفیت و سختی دیوار برشی نیمه‌مقید محسوب می‌شوند.



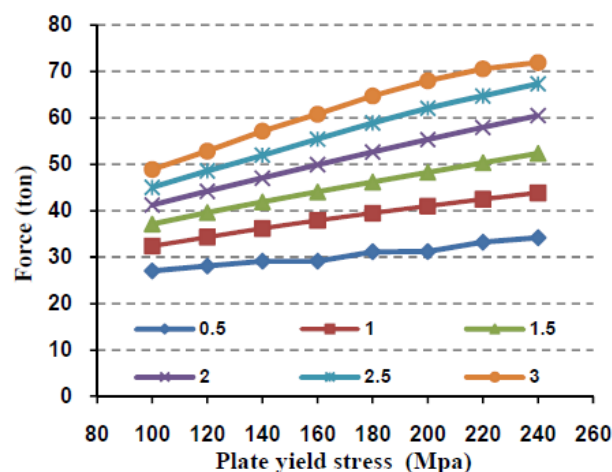
شکل ۲-۲۵، تأثیر مقدار تنش تسلیم ورق بر مقاومت سیستم با ورق به ضخامت ۱ میلی‌متر در تحقیق سادات خلردی

و برخورداری [۱۲]



شکل ۲-۲۶، تأثیر مقدار تنش تسلیم ورق بر مقاومت سیستم با ورق به ضخامت ۳ میلی‌متر در تحقیق سادات خلردی و برخورداری [۳]

با توجه به اشکال (۲-۲۵) و (۲-۲۶) مشاهده می‌شود که در تغییر مکان‌های کوچک، افزایش تنش تسلیم ورق تأثیر قابل توجهی بر سختی اولیه دیوار ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سختی اولیه دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید نسبت به تغییر ضخامت ورق حساس بوده ولی نسبت به تغییر تنش تسلیم ورق اثر کمی دارد. به عبارت دیگر، افزایش ضخامت ورق نقش مؤثرتری در ارتقای سختی اولیه سیستم دارد. در این تحقیق، همچنین نمونه‌هایی با ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ میلی‌متر و مقادیر تنش تسلیم ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰، ۲۰۰، ۲۲۰ و ۲۴۰ مگاپاسکال بررسی شدند و مقاومت نهایی آن‌ها ارزیابی گردید که نتایج آن در شکل (۲-۲۷) ارائه شده است.



شکل ۲-۲۸، مقاومت نهایی نمونه‌های با ضخامت‌ها و تنش‌های تسلیم متفاوت ورق جان در تحقیق سادات خلردی و

برخورداری [۱۲]

شکل (۲۶-۲) نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق تأثیر بیشتری بر مقاومت نهایی نمونه دارد نسبت

به افزایش تنش تسلیم ورق. به عنوان نمونه، با افزایش ضخامت ورق از ۵/۰ تا ۳ میلی‌متر، مقاومت نمونه بین

۸۰ تا ۱۱۸ درصد افزایش یافته است. در مقابل، با افزایش تنش تسلیم ورق از ۱۰۰ تا ۲۴۰ مگاپاسکال، مقاومت

نهایی تنها بین ۲۶/۶ تا ۵۰/۸ درصد افزایش یافته است. این نتایج بیانگر آن است که ضخامت ورق عامل

تعیین کننده تری در ظرفیت نهایی دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید محسوب می‌شود.

۲-۳-۳- مدل‌های آزمایشگاهی چوی و همکاران

چوی و پارک در سال ۲۰۰۸ یک نوع دیوار برشی فولادی را تحت عنوان دیوار برشی فولادی با اتصال

بخشی مورد آزمایش قرار دادند. در این سیستم، ورق جان تنها به تیرهای بالا و پایین متصل بود و ستون‌ها

آزاد باقی می‌ماندند (شکل ۲-۲۸). برای مقایسه رفتار این نمونه، آن‌ها یک دیوار برشی فولادی معمولی را نیز

مورد بررسی قرار دادند که در آن شرایط هندسی اعضای مرزی و ویژگی‌های مکانیکی ورق جان حفظ شده

بود. شکل (۲۹-۲) نمونه دیوار برشی معمولی را نشان می‌دهد و این مطالعه امکان مقایسه عملکرد دو سیستم

متفاوت را فراهم می‌سازد [۱۳].



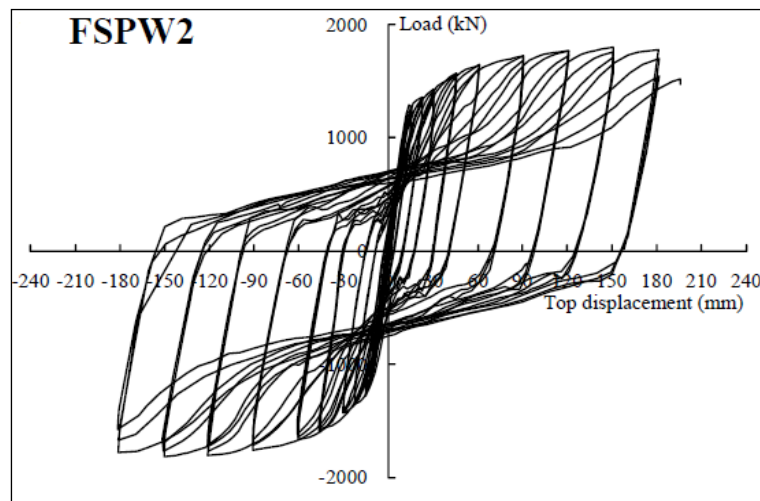
شکل ۲-۲۸، نمونه آزمایشگاهی با اتصال بخشی در تحقیق Choi و Park [۱۳]



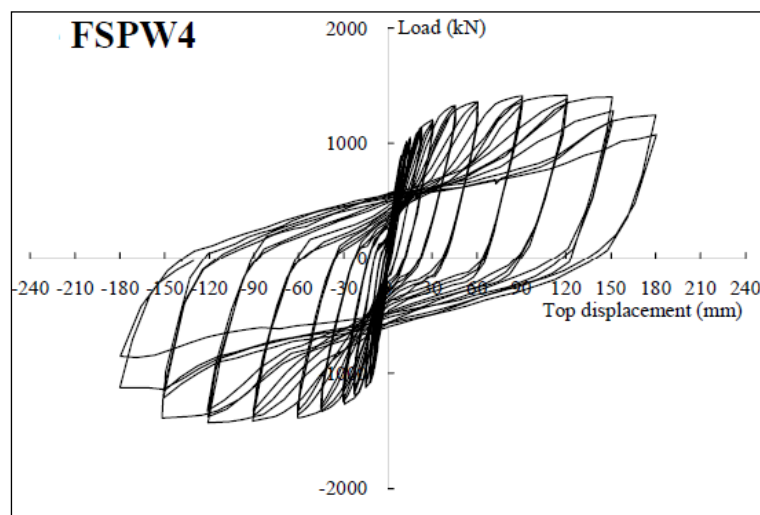
شکل ۲-۲۹، نمونه آزمایشگاهی با اتصال کامل در تحقیق Choi و Park [۱۳]

برای مقایسه رفتار دیوار برشی فولادی با اتصال بخشی و نمونه معمولی، مشخصات مکانیکی و ابعاد اعضای مرزی و ورق جان در هر دو نمونه یکسان در نظر گرفته شد و تنها تفاوت آن‌ها در نوع اتصال ورق به اعضای مرزی بود. منحنی‌های هیستریزیس دو نمونه در اشکال (۲-۳۰) و (۲-۳۱) ارائه شده و هر دو نمونه تا تغییر مکان یکسان بارگذاری گردیدند. نتایج نشان داد که نمونه‌های FSPW4 و FSPW2 دارای سختی اولیه یکسانی بودند، اما مقاومت نهایی FSPW2 کمتر از FSPW2 بود. همچنین، جذب انرژی نمونه FSPW4 حدود

۶۵ درصد جذب انرژی نمونه FSPW2 گزارش شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اتصال بخشی ورق به اعضای مرزی باعث کاهش ظرفیت نهایی و جذب انرژی دیوار می‌شود. لازم به ذکر است که این نوع دیوار برشی فولادی هنوز در مرحله تحقیقات بوده و در آیین‌نامه‌ها مطرح نشده است. شکل (۲-۳۲) نیز تغییر شکل دو نمونه را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۳۰، منحنی هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی معمولی در تحقیق Choi و Park [۱۳]



شکل ۲-۳۱، منحنی هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با اتصال بخشی در تحقیق Choi و Park



شکل ۲-۳۲، تغییر شکل نمونه‌های FSPW2 و FSPW4 در بارگذاری نهایی در تحقیق Choi و Park [۱۳]

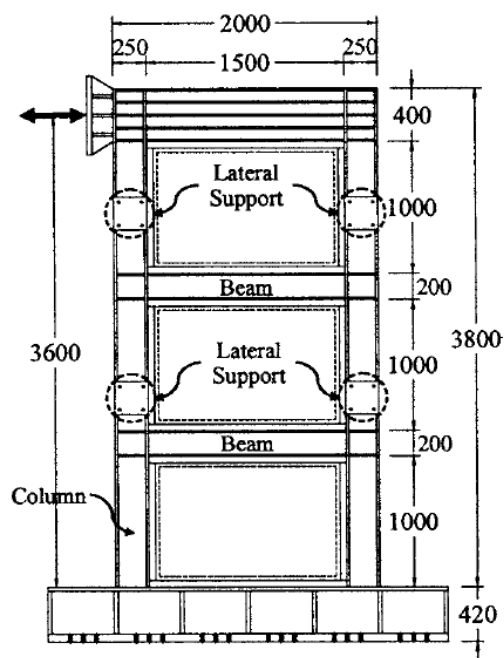
۲-۳-۴- مدل‌های آزمایشگاهی پارک و همکاران

پارک و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی تأثیر ضخامت ورق و سختی ستون‌ها بر رفتار دیوارهای برشی فولادی پرداختند و پنج نمونه آزمایشگاهی مختلف را مورد آزمایش قرار دادند که مشخصات نمونه‌ها در جدول (۲-۳) نشان داده شده است. نمونه‌های سری S از تیرها و ستون‌های یکسانی برخوردار بودند و تنها تفاوت آن‌ها در ضخامت ورق جان بود، در حالی که نمونه‌های سری W ستون‌های ضعیف‌تری داشتند. نمونه‌های SC2T، SC4T و SC6T تنها در ضخامت ورق داخلی متفاوت بودند و نمونه‌های WC4T و WC6T مشابه SC4T و SC6T بودند با این تفاوت که ستون‌های ضعیف‌تری داشتند. منحنی‌های هیستریزیس هر یک از نمونه‌ها در شکل (۲-۳۳) ارائه شده و جدول (۲-۴) مقاومت نهایی و سختی اولیه نمونه‌ها را در دو جهت بارگذاری مثبت و منفی نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت ورق منجر به افزایش مقاومت و سختی اولیه دیوار می‌شود و رفتار نمونه‌ها به‌طور مستقیم تحت تأثیر ضخامت ورق و صلبیت ستون‌ها قرار دارد [۱۴].

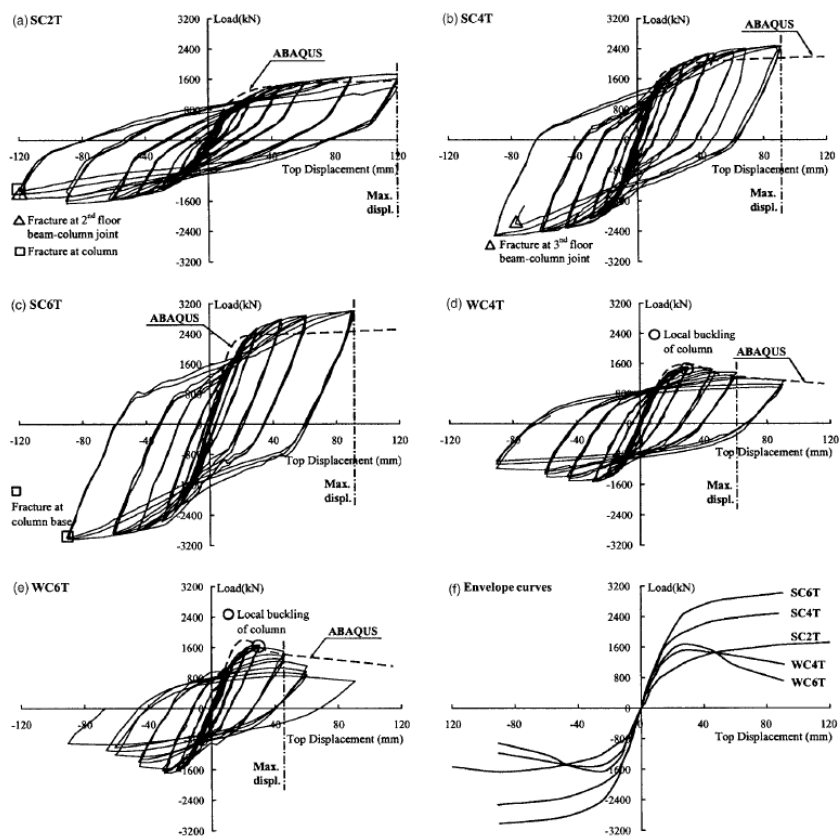
یکی دیگر از اهداف این تحقیق، بررسی اثر صلبیت خمشی ستون‌ها بر رفتار چرخه‌ای دیوار بود. نمونه‌های WC4T و WC6T به دلیل ستون‌های ضعیف‌تر، تحت اثر میدان‌های کششی ورق جان دچار کمانش زودرس شدند و منحنی هیستریزیس آن‌ها در شکل (۲-۳۴) زمان وقوع کمانش ستون‌ها را نشان می‌دهد. پس از کمانش ستون‌ها، قاب به‌طور ناگهانی دچار افت مقاومت شد و شکل (۲-۳۵) کمانش در ستون‌های طبقه اول نمونه WC4T را نمایش می‌دهد. شکل (۲-۳۶) نیز انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها در طول بارگذاری را نشان می‌دهد؛ نتایج بیانگر آن است که نمونه‌های سری W به دلیل کمانش زودرس ستون، انرژی کمتری جذب کرده‌اند، در حالی که در نمونه‌های سری S با افزایش ضخامت ورق جان، مقدار انرژی جذب‌شده افزایش یافته است [۱۴].

جدول ۲-۳، مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی Park و همکاران [۱۴]

| نمونه | ضخامت ورق | | مقطع ستون |
|-------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | ضخامت اسمی (میلی‌متر) | ضخامت واقعی (میلی‌متر) | |
| SC2T | ۲ | ۲/۴۹ | H 250 X 250 X 20 X 20 |
| SC4T | ۴ | ۴/۴۹ | H 250 X 250 X 20 X 20 |
| SC6T | ۶ | ۶/۵ | H 250 X 250 X 20 X 20 |
| WC4T | ۴ | ۴/۴۹ | H 250 X 250 X 9 X 12 |
| WC6T | ۶ | ۶/۵ | H 250 X 250 X 9 X 12 |



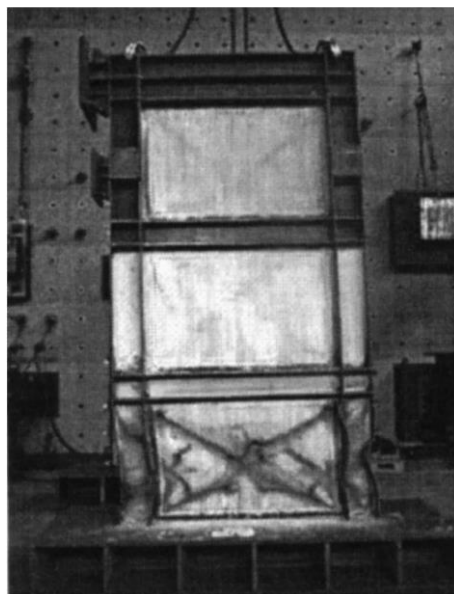
شکل ۲-۳۳، ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی Park و همکاران [۱۴]



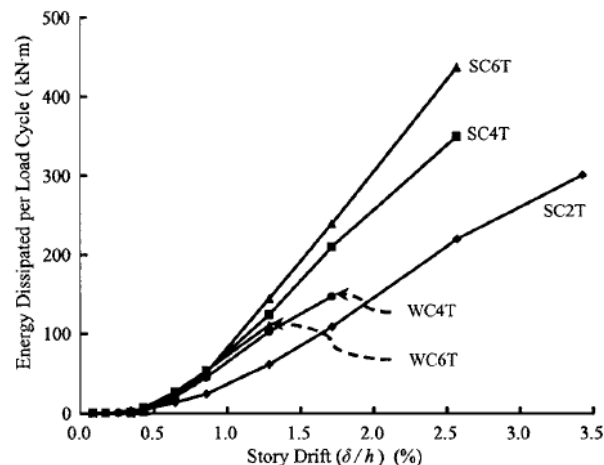
شکل ۲-۳۳، منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های آزمایشگاهی Park و همکاران [۱۴]

جدول ۴-۲- نتایج حاصل از آزمایش برای نمونه‌های آزمایشگاهی Park و همکاران [۱۴]

| نمونه | مقاومت ماکزیمم (کیلو نیوتن) | | سختی اولیه (کیلو نیوتن بر میلی‌متر) | |
|-------|--------------------------------|-------|--|-----|
| | + | - | + | - |
| SC2T | ۱۷۲۱ | -۱۶۶۳ | ۷۹ | ۸۷ |
| SC4T | ۲۴۸۰ | -۲۵۳۲ | ۱۱۱ | ۱۱۱ |
| SC6T | ۳۰۲۰ | -۳۰۲۱ | ۱۱۷ | ۱۲۴ |
| WC4T | ۱۵۲۰ | -۱۵۲۶ | ۹۲ | ۹۳ |
| WC6T | ۱۶۷۰ | -۱۶۸۲ | ۹۵ | ۱۰۱ |



شکل ۴-۳، کمانش ستون نمونه طبقه اول در نمونه WC4T در تحقیق Park و همکاران [۱۴]



شکل ۳۵-۲، انرژی جذب شده توسط نمونه‌های آزمایشگاهی Park و همکار در طی بارگذاری در تحقیق Park و

همکاران [۱۴]

۲-۳-۵- مدل‌های آزمایشگاهی شکسته‌بند و همکاران

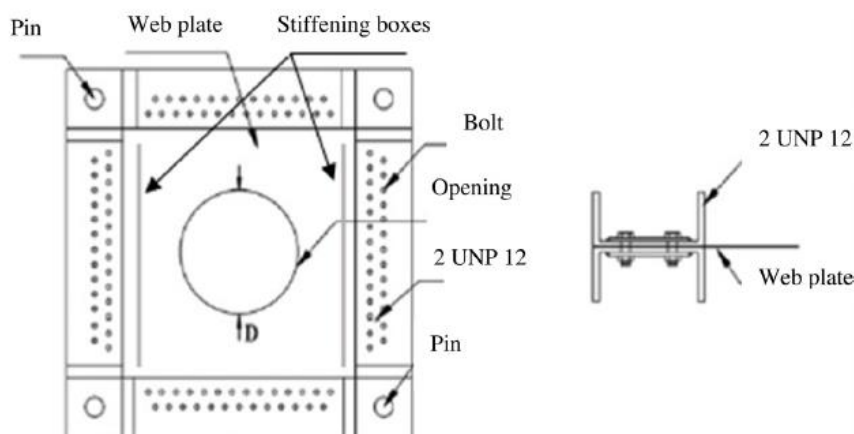
شکسته‌بند و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی پرداختند که در آن‌ها ورق جان تنها به تیرها متصل بود و از فولاد نرم (LYS) یا فولاد پر مقاومت (HYS) استفاده شده بود. در این تحقیق چهار نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت (جدول (۲-۵))؛ دو نمونه دارای ورق با فولاد پر مقاومت و دو نمونه دارای ورق با فولاد نرم بودند. ضخامت ورق در همه نمونه‌ها ۵/۰ میلی‌متر بود و نمونه‌های SSW-BO-1 و SSW-BO-3 فاقد بازشو، در حالی که نمونه‌های دیگر دارای بازشویی با نسبت ۰/۳۶ بودند. طرح کلی نمونه‌ها در شکل (۲-۳۶) نشان داده شده و بارگذاری دوره‌ای بر اساس پروتکل ATC24 انجام شد. منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌ها در شکل (۲-۳۷) ارائه شده و نشان‌دهنده پینچینگ شدید در نمونه‌ها است که عمدتاً ناشی از کمانش خارج از صفحه، عملکرد میدان کششی و دوران آزاد اتصالات اعضای مرزی می‌باشد [۱۵].

نتایج نشان داد که نمونه‌های دارای ورق پر مقاومت، مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌های مشابه با فولاد نرم داشتند. مقاومت نمونه‌های بدون بازشو SSW-BO-1 و SSW-BO-3 به ترتیب ۱۹/۶ و ۱۱/۴۸ کیلو نیوتن بود، در حالی که مقاومت نمونه‌های بازشو دار SSW-BO-2 و SSW-BO-4 برابر ۱۲/۲۸ و ۷/۱۳ کیلو نیوتن

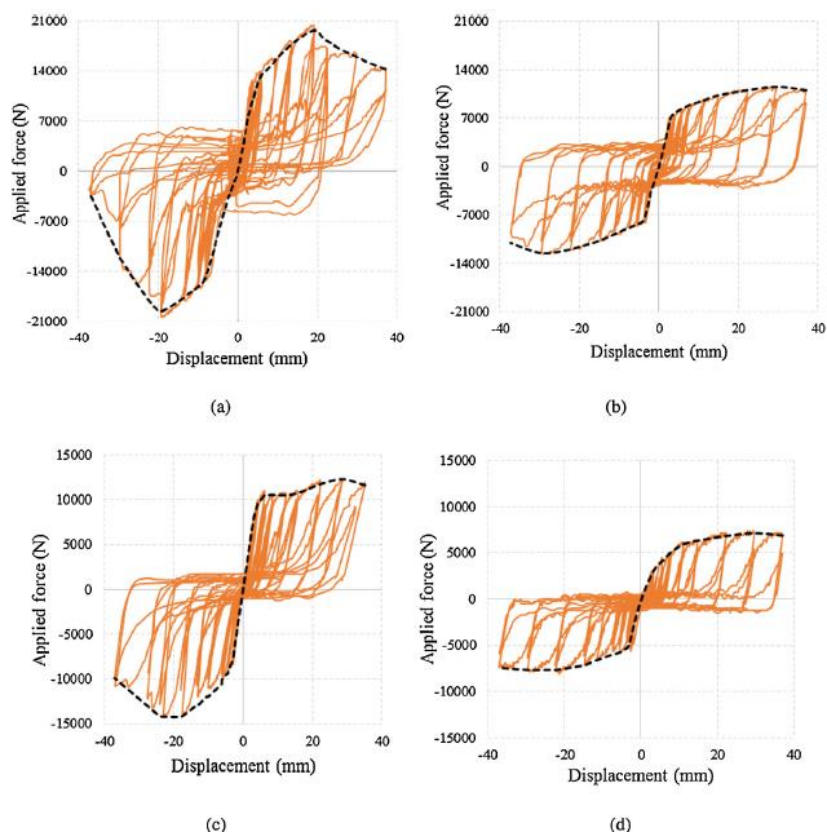
گزارش شد. بنابراین ایجاد بازشو منجر به کاهش مقاومت نمونه‌ها گردید. همچنین، میزان انرژی جذب‌شده که با مساحت زیر منحنی پوش نشان داده می‌شود، در نمونه‌های دارای ورق پر مقاومت بیشتر بود و نشان‌دهنده ظرفیت بالاتر این نمونه‌ها در مستهلک کردن انرژی لرزه‌ای نسبت به نمونه‌های با فولاد نرم است. این نتایج بر اهمیت انتخاب نوع فولاد و وجود یا عدم بازشو در طراحی دیوارهای برشی فولادی تأکید دارند.

جدول ۲-۵، جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی شکسته‌بند و همکاران [۱۵]

| Specimen | Plate thickness, t (mm) | Primary columns and beams | Stiffening boxes | Web plate material | Perforation diameter (mm) | Opening ratio, t/h |
|----------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| SSW-BO-1 | 0.5 | 2UNP120 | 2 box (20 mm × 30 mm × 2 mm) | HYS | 0 | 0 |
| SSW-BO-2 | 0.5 | 2UNP120 | 2 box (20 mm × 30 mm × 2 mm) | HYS | 180 | 0.36 |
| SSW-BO-3 | 0.5 | 2UNP120 | 2 box (20 mm × 30 mm × 2 mm) | LYS | 0 | 0 |
| SSW-BO-4 | 0.5 | 2UNP120 | 2 box (20 mm × 30 mm × 2 mm) | LYS | 180 | 0.36 |



شکل ۲-۳۶، طرح کلی نمونه‌های مورد آزمایش [۱۵]

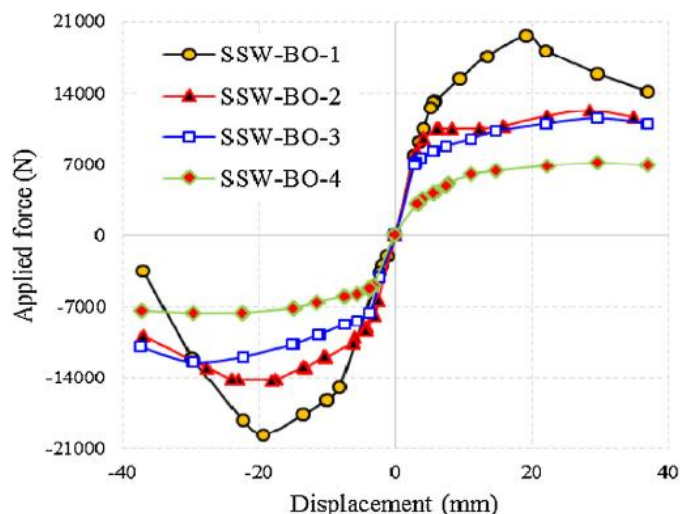


شکل ۲-۳، منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های مورد آزمایش؛ a: نمونه SSW-BO-1؛ b: نمونه SSW-BO-2؛ c: نمونه SSW-BO-3؛ d: نمونه SSW-BO-4 [۱۵]

جدول ۲-۶، مقاومت حاصل از تحلیل چرخه‌ای^۱ برای نمونه‌های مورد آزمایش [۱۵]

| Specimen | Max. strength | | Ultimate strength | | Strength degradation | |
|----------|------------------|------------------|-------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| | P_{max}^+ (kN) | P_{min}^- (kN) | P_u^+ (kN) | P_u^- (kN) | (kN)/(kN) ⁺ (%) | (kN)/(kN) ⁻ (%) |
| SSW-BO-1 | 19.60 | -19.49 | 14.19 | -3.44 | 0.72 | 0.17 |
| SSW-BO-2 | 12.28 | -14.23 | 10.99 | -9.89 | 0.89 | 0.69 |
| SSW-BO-3 | 11.48 | -12.48 | 10.99 | -10.99 | 0.96 | 0.88 |
| SSW-BO-4 | 7.13 | -7.63 | 6.89 | -7.38 | 0.97 | 0.96 |

¹ Cyclic



شکل ۲-۳۸، پوش منحنی هیستریزیس نمونه‌های آزمایشگاهی [۱۵]

۲-۳-۶- تحقیق وانگ و همکاران

وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی را مورد بررسی قرار دادند و برای این منظور ۹ مدل مختلف دیوار برشی فولادی را از طریق روش غیرخطی اجزاء محدود تحلیل کردند. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که در مناطق با لرزه‌خیزی شدید، انتخاب فرم بهینه دیوار برشی فولادی نیازمند توجه همزمان به چندین معیار است. این معیارها شامل ظرفیت نهایی دیوار، رفتار هیستریزیس، مدهای شکست محتمل، شکل‌پذیری لرزه‌ای و عملکرد اقتصادی سیستم می‌باشد. در این مطالعه مشخص شد که مدل‌هایی که از سخت‌کننده بهره می‌برند، به ویژه در شرایط لرزه‌ای شدید، عملکرد بهتری ارائه می‌دهند. سخت‌کننده‌های T شکل نقش مؤثری در افزایش ظرفیت اتلاف انرژی و بهبود شکل‌پذیری دیوار دارند. علاوه بر این، استفاده از این سخت‌کننده‌ها موجب کاهش تمرکز تنش در ستون‌های پیرامونی دیوار شده و تغییر شکل‌های خارج از صفحه ورق جان را کنترل می‌کند. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که طراحی بهینه دیوارهای برشی فولادی باید به صورت جامع و با در نظر گرفتن همه عوامل مؤثر انجام شود تا عملکرد لرزه‌ای پایدار و اقتصادی حاصل گردد [۱۶].

۲-۳-۷- تحقیق کریشان و همکاران

مقاله کریشان و همکاران به بررسی غیرخطی سه بعدی شش ساختمان قاب خمشی فولادی ۱۹ طبقه تحت حرکت زمین نزدیک به منبع می پردازد که بر اساس آیین نامه ساختمان منظم سال ۱۹۹۷ و رکوردهای زمین لرزه های با بزرگی $6/7$ تا $7/3$ طراحی شده اند. در این میان، سه ساختمان دارای نامنظمی گوشه ای و سه ساختمان دیگر دارای نامنظمی پلان پیچشی هستند. نتایج نشان داد رکوردهای زمین لرزه تقاضاهای دررفت حدود $0/05$ و چرخش پلاستیکی 4 تا 5 درصد رادیان در ساختمان های با گوشه های نامنظم ایجاد می کنند و در ساختمان های حساس به پیچش، چرخش پلاستیکی در یک وجه ساختمان تقریباً دو برابر وجه مقابل است. الگوی تسلیم نامتقارن حاکی از افزونگی کمتر سیستم مقاوم جانبی بوده و شکست قاب ها تحت بارگذاری شدید می تواند منجر به از دست رفتن کلی مقاومت در برابر پیچش شود، که اهمیت طراحی دقیق قاب های خمشی و کنترل نامنظمی های پلان و گوشه ای برای افزایش پایداری و شکل پذیری لرزه ای ساختمان های بلند را نشان می دهد [۱۷].

۲-۳-۸- تحقیق بای و همکاران

خطر فروریختن سازه های ساختمانی یکی از عوامل اصلی ایجاد تلفات جانی و خسارات اقتصادی ناشی از زلزله است. یونگ تائو و همکاران آزمایش میز لرزه ای را بر روی قاب های خمشی فولادی کم ارتفاع با در نظر گرفتن نامنظمی جرم در ارتفاع انجام دادند. در این آزمایش، قاب ها در معرض امواج لرزه ای طبیعی و مصنوعی قرار گرفتند و نتایج نشان داد که نمونه ای با 5 درصد جرم اضافی در طبقه بالا، هنگام مواجهه با زلزله های شدیدتر از حد طراحی، شتاب و دررفت بیشتری از خود نشان داد. تحلیل های دینامیکی افزایشی برای ارزیابی احتمالات سه حالت حدی شامل استفاده بی وقفه، ایمنی زندگی و جلوگیری از فروپاشی انجام شد. همچنین، منحنی های شکنندگی لرزه ای از طریق ترکیبی از رکوردهای زمین نزدیک به گسل برای مدل های عددی با و بدون نامنظمی جرم استخراج شد. نتایج نشان داد که نامنظمی جرم عمودی نقش مهمی در تعیین رفتار

فروپاشی و طراحی لرزه‌ای سازه‌ها دارد و باید در تحلیل‌های طراحی برای جلوگیری از شکست کلی سیستم به دقت مدنظر قرار گیرد [۱۸].

۲-۳-۹- تحقیق حمیدیا و همکاران

برآورد دوره تناوب بنیادی ساختمان‌ها برای تعیین برش پایه لرزه‌ای واقعی اهمیت بالایی دارد، زیرا کدهای طراحی لرزه‌ای معادلات متفاوتی برای محاسبه دوره تناوب اساسی قاب‌های خمشی فولادی ارائه می‌کنند. معادلات تجربی معمولاً تنها بر اساس ارتفاع ساختمان هستند و اثرات نامنظمی و تعامل خاک و سازه را در نظر نمی‌گیرند. حمیدیا و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک معادله تجربی جدید برای تخمین دوره الاستیک اساسی قاب‌های خمشی فولادی توسعه دادند که شامل پارامترهایی برای اثرات نامنظمی و تعامل خاک-سازه است. پایگاه داده این مطالعه شامل اطلاعات معماری و ژئوتکنیکی ۴۵ ساختمان بود و معادله پیش‌بینی شده دقت رضایت‌بخشی نشان داد. نتایج پیش‌بینی با مقادیر به‌دست‌آمده از کدهای طراحی لرزه‌ای ۲۸۰۰ ایران، ASCE7-16 و UBC-97 مقایسه شد و همچنین با ۱۰ دوره تناوب اساسی استخراج‌شده از مدل‌های تحلیلی تأیید گردید. نتایج نشان داد که دوره تناوب اصلی نوسان به‌دست‌آمده از معادلات پیش‌بینی برای ساختمان‌های متوسط و بلند دقیق‌تر از مقادیر ارائه‌شده در کدهای طراحی لرزه‌ای است. به طور کلی، مقادیر دوره تناوب ارائه‌شده در کدهای موجود اغلب کمتر از مقادیر واقعی برای ساختمان‌ها برآورد می‌شوند [۱۹].

۲-۳-۱۰- تحقیق کائو و همکاران

در مقاله‌ای که کائو و همکاران در سال ۲۰۲۰ منتشر کردند، سازه‌های دیواری بتنی مسلح با طراحی نامنظم به‌صورت محاسباتی مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور، چهار مدل منظم و نامنظم از ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه (دو طبقه) و میانی (پنج طبقه) تحلیل شدند. ارزیابی احتمالی آسیب لرزه‌ای این سازه‌ها با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرالاستیک افزایشی انجام شد تا منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای در سطوح مختلف آسیب تولید شود. منحنی‌های شکنندگی بر اساس دو شاخص شامل حداکثر آسیب و شاخص

سه‌بعدی Jeong-Nansha ارائه شد. نتایج نشان داد که سازه‌های نامنظم نسبت به سازه‌های منظم احتمال آسیب بیشتری دارند. همچنین، میزان خسارت محاسبه‌شده با استفاده از دو شاخص آسیب نشان می‌دهد که شاخص سه‌بعدی Jeong-Nansha نتایج دقیق‌تر و برتری را برای ارزیابی آسیب در این نوع سازه‌ها ارائه می‌دهد. این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن نامنظمی در طراحی و تحلیل لرزه‌ای دیوارهای بتنی مسلح را برجسته می‌کند [۲۰].

۲-۳-۱۱- تحقیق ژانگ و همکاران

در طراحی ساختمان‌های بلند، انتخاب سیستم جانبی مقاوم در برابر باد و بارگذاری لرزه‌ای اهمیت بسیاری دارد و غالباً چالش اصلی مهندسی سازه محسوب می‌شود. در ساختمان‌های مبتنی بر دیوار برشی، فرآیند طراحی معمول با تهیه نقشه طبقات توسط معمار آغاز شده و سپس مهندس سازه با تجربه خود، دیوارهای برشی را برای تعادل الزامات قرار می‌دهد. این روش سنتی می‌تواند کند و ناکارآمد بوده و نیازمند آزمون و خطای متعدد باشد که به ندرت به بهینه‌ترین راهکار منجر می‌شود. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با ارائه یک سیستم بهینه‌سازی شامل فرمول‌بندی برنامه ساختار زمین، الگوریتم تکاملی اصلاح‌شده و تکنیک‌های محاسباتی نوآورانه، این فرآیند را تسریع کردند. بر خلاف تحقیقات پیشین که تمرکز صرف بر عملکرد سازه یا چیدمان معماری داشتند، این رویکرد هر دو را همزمان در نظر می‌گیرد. روش ارائه‌شده طراحی محاسباتی کارآمدی برای چیدمان دیوار برشی در پلان ارائه می‌دهد که وزن سازه را با محدودیت‌هایی در پیچش، مقاومت خمشی و برشی، دریفت، بازشوها و دسترسی به حداقل می‌رساند و می‌تواند از ابتدای طراحی پلان یا پس از تهیه نقشه معماری اجرا شود. این مقاله با مطالعات موردی نشان می‌دهد که این رویکرد توانایی بهبود عملکرد و بهره‌وری مصالح در ساختمان‌های بلند را دارد [۲۱].

۲-۳-۱۲- تحقیق آبراهام و همکاران

رفتار یک ساختمان چندطبقه در هنگام زلزله شدید به پیکربندی سازه وابسته است و نامنظمی در پلان یا ارتفاع به عنوان یکی از عوامل اصلی خرابی شناخته می‌شود. سازه‌های نامنظم، به‌ویژه در مناطق لرزه‌خیز، توجه ویژه‌ای نیاز دارند، زیرا اغلب ترکیبی از بی‌نظمی‌ها را دارند و تمرکز تنها بر یک نوع نامنظمی ممکن است پاسخ لرزه‌ای دقیق را پیش‌بینی نکند. انتخاب نوع، درجه و محل نامنظمی‌ها در طراحی سازه اهمیت دارد و می‌تواند کاربری و زیبایی ساختمان را بهبود بخشد. ناوین و همکاران به بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح با ترکیب‌های مختلف نامنظمی پرداختند؛ یک قاب منظم نه‌طبقه با اصلاحات مختلف در پلان و ارتفاع، شامل ۳۴ پیکربندی با نامنظمی تک و ۲۰ پیکربندی با ترکیبی از نامنظمی‌ها شد و در مجموع ۵۴ پیکربندی نامنظم تحلیل و مقایسه گردید. تمامی قاب‌ها تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار گرفتند و پاسخ‌ها به صورت عددی محاسبه شد. نتایج نشان داد که نامنظمی به‌طور قابل توجهی رفتار لرزه‌ای سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ از میان نامنظمی‌های منفرد، بی‌نظمی سفتی بیشترین اثر را دارد و در پیکربندی‌های ترکیبی، ترکیب جرم، سفتی و نامنظمی هندسی عمودی بیشترین پاسخ را نشان می‌دهد. این یافته‌ها می‌توانند به طراحی هوشمندانه سازه‌های نامنظم کمک کنند و عملکرد لرزه‌ای آن‌ها را بدون آسیب رساندن به سازه بهینه نمایند [۲۲].

فصل سوم

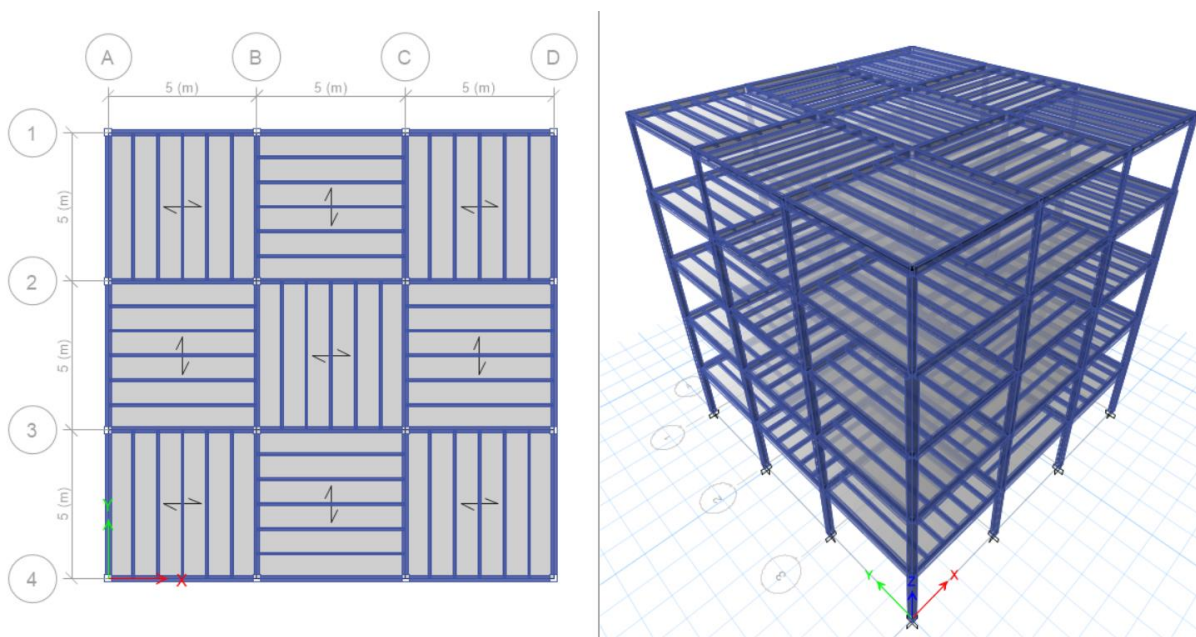
مواد و روش تحقیق

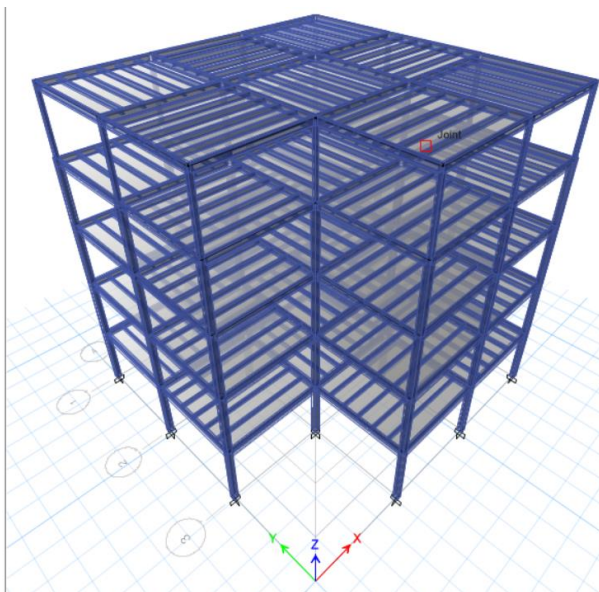
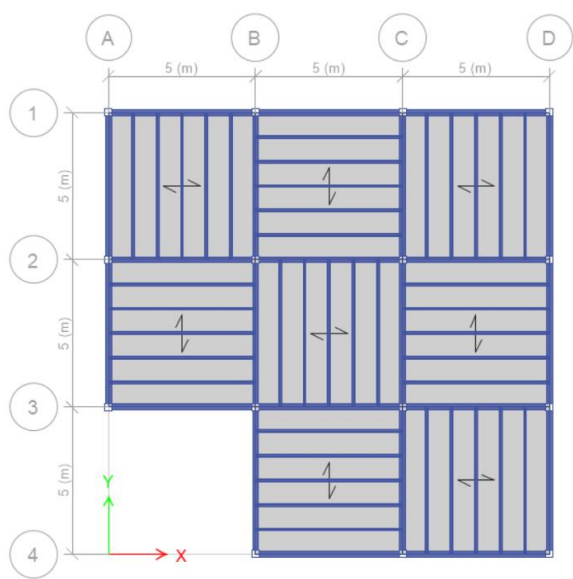
در این فصل نرم‌افزار مورد استفاده و مشخصات لازمه برای مدلسازی، بارگذاری سازه تشریح گردیده و مشخصات در نظر گرفته شده برای مدلسازی سازه‌ها در نرم‌افزار ETABS تشریح شده و نحوه مدلسازی دیوار برشی فولادی آورده شده است که در ادامه به آنها پرداخته‌ایم.

۳-۲- مدلسازی

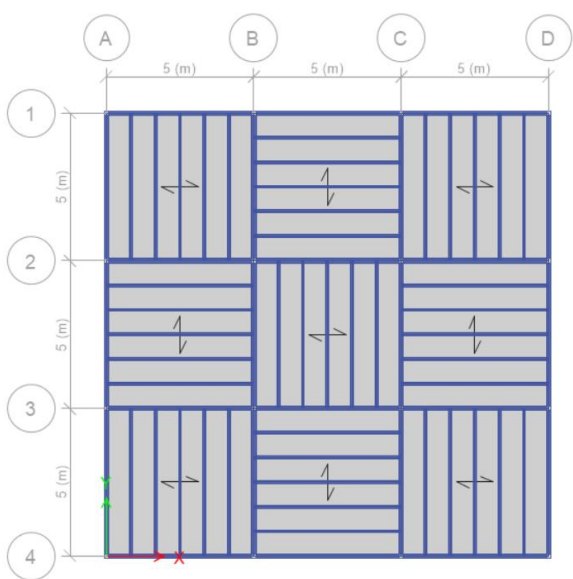
۳-۲-۱- کلیات

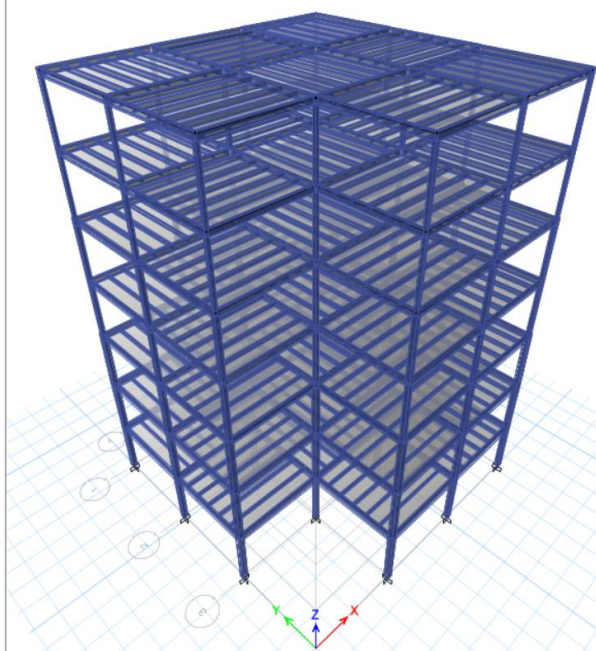
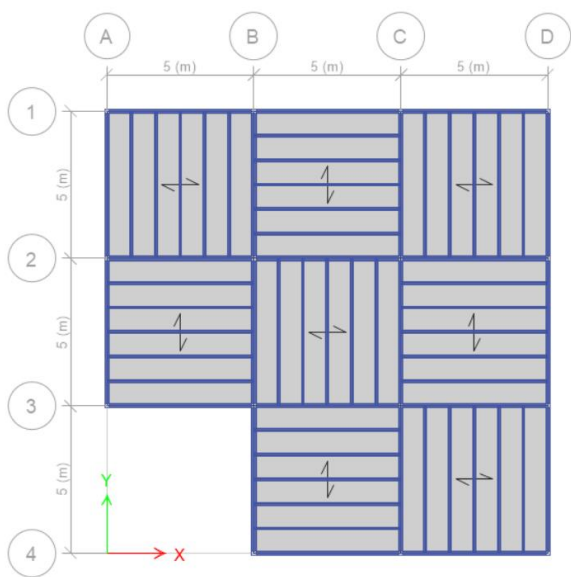
برای این تحقیق سازه‌های با تعداد طبقات ۵، ۷ و ۱۲ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی متوسط استفاده شده است. تمامی سازه‌ها بر روی پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد واقع شده و بر روی زمین نوع II قرار دارند. کاربری سازه‌ها مسکونی فرض شده‌اند و تعداد دهانه‌ها برابر ۳ عدد و طول دهانه‌ها برابر ۵ متر هستند و یکبار بصورت منظم و یکبار بصورت نامنظم مدلسازی شده‌اند، که در شکل (۳-۱) تا (۳-۳) برای سازه‌های ۵، ۷ و ۱۲ طبقه به ترتیب نشان داده شده است.



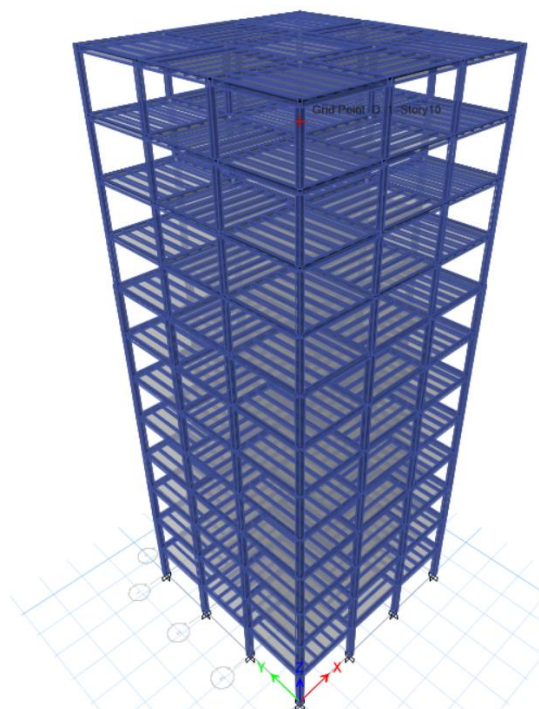
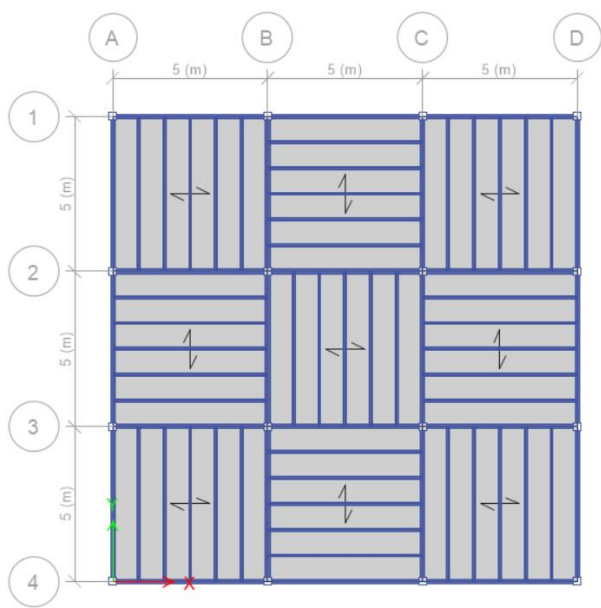


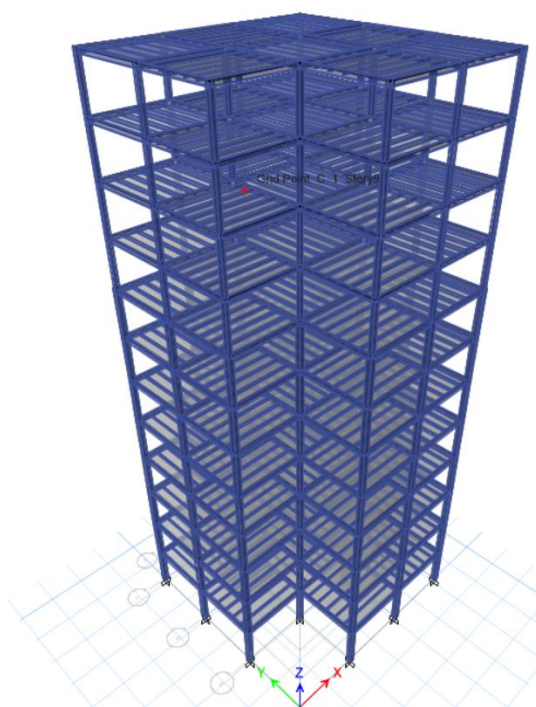
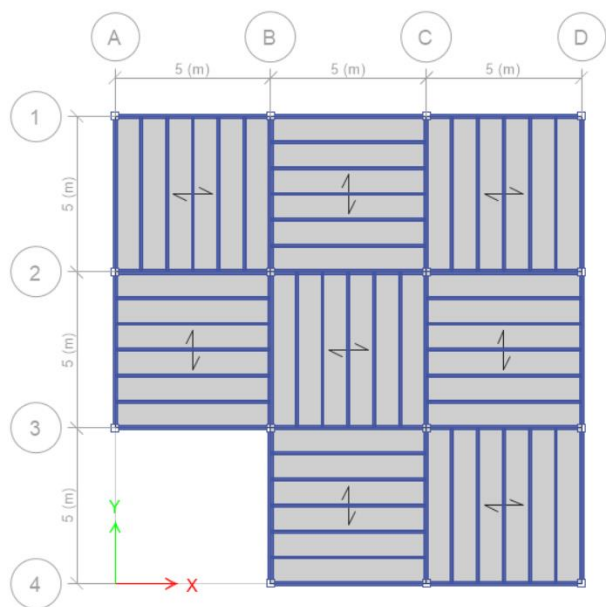
شکل ۱-۳، مدل سازی سازه های ۵ طبقه بصورت منظم و نامنظم در پلان





شکل ۲-۳، مدل سازی سازه های ۷ طبقه بصورت منظم و نامنظم در پلان





شکل ۳-۳، مدلسازی سازه‌های ۱۲ طبقه بصورت منظم و نامنظم در پلان

۳-۲-۲- مشخصات مصالح

برای سازه‌ها از دو نوع مصالح بتن و فولاد استفاده خواهد شد که مشخصات لازم برای آنها مطابق جداول (۱-۳) و (۲-۳) خواهد بود.

جدول ۱-۳، مشخصات مصالح بتن

| مشخصات | وزن مخصوص | مدول الاستیسیته | نسبت پوآسون | ضریب انبساط حرارتی | مقاومت فشاری بتن |
|--------|-----------|-----------------|-------------|-----------------------|---------------------|
| واحد | kgf/m^3 | Mpa | --- | $1/^\circ C$ | Mpa |
| مقدار | 2500 | 23500 | 0.2 | 0.00001 | 25 |

جدول ۳-۲، مشخصات مصالح فولاد

| مشخصات | وزن مخصوص | مدول الاستیسیته | نسبت پواسون | ضریب انبساط حرارتی | مقاومت تسلیم | مقاومت گسیختگی |
|--------|-----------|-----------------|-------------|--------------------|--------------|----------------|
| واحد | kgf/m^3 | Mpa | --- | $1/^\circ C$ | Mpa | Mpa |
| مقدار | 7850 | 200000 | 0.3 | 0.000012 | 240 | 370 |

۳-۲-۳- مشخصات بارگذاری

برای بارگذاری سازه‌ها الگوهای بار لازم اعم از بار مرده (Dead)، بار زنده (Live) و بار زلزله (Seismic) تعریف شده است بار ناشی از بارهای ثقلی در جدول (۳-۳) و برای محاسبه بار زلزله نیاز به محاسبه ضریب زلزله (C) و ضریب توزیع برش پایه در طبقات (K) می‌باشد که در جدول (۳-۴) آورده شده است.

جدول ۳-۳، بارهای ثقلی سازه

| نوع بار | وزن یک متر مربع |
|--------------------------|--------------------|
| واحد | kgf/m^2 |
| بار مرده کف طبقات | 250 (بدون وزن بتن) |
| بار زنده کف طبقات | 200 |
| بار مرده ناشی از دیوارها | 300 |

جدول ۳-۴، محاسبه ضریب زلزله و ضریب توزیع برش پایه سازه قاب خمشی

| مشخصات | سازه ۵ طبقه | سازه ۷ طبقه | سازه ۱۲ طبقه |
|---------------------------|-------------|-------------|--------------|
| ارتفاع | 16 m | 22.4 m | 38.4 m |
| نسبت شتاب مبنا (A) | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| زمان تناوب سازه (T) | 0.80 | 1.03 | 1.543 |
| ضریب بازتاب سازه (B) | 1.6563 | 1.3426 | 0.9793 |
| ضریب اهمیت سازه (I) | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| ضریب رفتار سازه (R_u) | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| ضریب زلزله (C) | 0.1159 | 0.0940 | 0.0686 |
| ضریب توزیع برش پایه (K) | 1.15 | 1.265 | 1.521 |

۳-۲-۴- مقاطع سازه

بعد از انجام مدلسازی و بارگذاری سازه‌ها مورد تحلیل و طراحی گرفته‌اند که پس از انجام طراحی‌های مختلف و کنترل مقاومت اعضاء، تغییر مکان نسبی طبقات (دریفت) و رعایت ضابطه تیر ضعیف - ستون قوی مقاطع سازه تحت تحلیل استاتیکی معادل به دست آمده‌اند. لازم به ذکر است که تمامی ضوابط مربوط به شکل‌پذیری متوسط در تعریف مقاطع تیر و ستون کنترل شده است و مقاطع به دست آمده تمامی ضوابط آئین‌نامه‌ای و اجرایی سازه‌های فولادی را اقلان خواهد نمود. مقاطع تا حد امکان و عرف اجرایی تیپ‌بندی شده‌اند و براساس بحرانی‌ترین نیروی طبقات ملاک عمل قرار گرفته‌اند و برای ستون‌ها از مقاطع باکس و برای تیرها از مقاطع تیورورق و برای تیرهای فرعی سقف کامپوزیت از تیرهای IPE استفاده شده‌اند، که مقاطع به دست آمده برای سازه در جدول (۳-۵) آورده شده است.

جدول ۳-۵، مقاطع استفاده شده در سازه

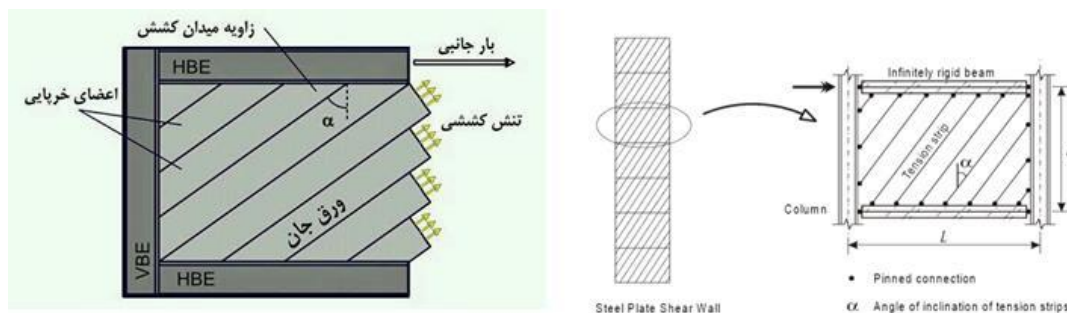
| تیرهای فرعی | | تیرهای اصلی | | ستون‌ها | | سازه |
|-------------|----------|-----------------|----------|--------------|----------|--------------|
| IPE200 | St1~St5 | PL30*0.8-20*1.5 | St1~St2 | Box25*25*2.0 | St1~St4 | سازه ۵ طبقه |
| | | PL28*0.8-15*1.5 | St3~St5 | Box15*15*1.2 | St5 | |
| IPE200 | St1~St5 | PL30*0.8-20*1.5 | St1~St2 | Box25*25*2.0 | St1~St3 | سازه ۷ طبقه |
| | | PL28*0.8-15*1.5 | St3~St7 | Box20*20*1.5 | St4~St5 | |
| | | | | Box15*15*1.2 | St6~St7 | |
| IPE200 | St1~St12 | PL35*0.8-20*2.0 | St1~St4 | Box35*35*2.5 | St1~St4 | سازه ۱۲ طبقه |
| | | PL30*0.8-20*2.0 | St5~St8 | Box30*30*2.0 | St5~St8 | |
| | | PL30*0.8-15*1.5 | St9~St12 | Box25*25*2.0 | St9~St12 | |

۳-۳- روش‌های تحلیل دیوار برشی فولادی

تحلیل دیوارهای برشی فولادی در برابر بارهای جانبی با دو هدف اصلی دنبال می‌شود. نخستین هدف، محاسبه نیروهای وارد بر اعضای مرزی به منظور طراحی آن‌ها است؛ به گونه‌ای که نیروهای محوری و برشی در تیرها و ستون‌ها، همچنین تنش‌های ایجادشده در ورق جان مشخص گردد تا ابعاد مناسب برای این المان‌ها انتخاب شود. هدف دوم، برآورد تغییرمکان جانبی قاب تحت بارهای لرزه‌ای یا بادی است که نقش مهمی در ارزیابی سختی و پایداری کلی سازه ایفا می‌کند. پژوهشگران برای دستیابی به این اهداف، روش‌های گوناگونی را جهت تحلیل و طراحی دیوارهای برشی فولادی معرفی کرده‌اند. شرط اساسی دستیابی به نتایج قابل اعتماد، استفاده از مدلی دقیق و منطبق با داده‌های آزمایشگاهی است. به طور کلی، چهار روش اصلی برای تحلیل این نوع دیوارها وجود دارد که شامل روش مدل نواری، روش غشایی ارتوتروپیک (غیرهمسان)، روش اجزای محدود و روش‌های غیرخطی تطبیقی می‌باشد که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند.

۳-۳-۱- روش مدل نواری

رفتار دیوارهای برشی فولادی نخستین بار بر پایه مکانیزم میدان کششی توسط Kulak, Thorburn و Montgomery در سال ۱۹۸۳ مطرح گردید. در این رویکرد، ورق جان به عنوان عنصری در نظر گرفته می‌شود که پس از کمانش برشی وارد مرحله میدان کششی شده و عمدتاً بارهای جانبی را از طریق کشش مورب منتقل می‌کند. رایج‌ترین روش مدلسازی در این زمینه، جایگزینی ورق جان با مجموعه‌ای از نوارهای کششی موازی است که صرفاً توانایی تحمل نیروهای محوری کششی را دارند. این نوارها به صورت منظم و با فاصله‌های مساوی در قاب قرار می‌گیرند و جهت آن‌ها بر اساس زاویه میدان کششی تعیین می‌شود. استفاده از این مدل، علاوه بر ساده‌سازی محاسبات، امکان برآورد دقیق نیروهای منتقل‌شده به تیرها و ستون‌های مرزی را نیز فراهم می‌آورد. همچنین مقایسه نتایج این روش با آزمایش‌های تجربی روی دیوارهای برشی فولادی نشان داده است که مدل نواری از دقت و سازگاری مطلوبی برخوردار بوده و به همین دلیل به عنوان یکی از روش‌های متداول و معتبر در تحلیل این سیستم‌ها شناخته می‌شود (شکل (۳-۴)).



شکل ۳-۴، مدل نواری دیوار برشی فولادی جهت تحلیل

مدول الاستیسیته نواریها برابر با مدول الاستیسیته فولاد در نظر گرفته می‌شود و سطح مقطع هر نوار معادل ضخامت ورق فولادی در فاصله بین نواریها محاسبه می‌گردد (در امتداد وجه عمود بر نواریها). نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اند که مدل نواری قادر است سختی اولیه پیش از تسلیم یک دیوار برشی فولادی و همچنین نیروهای وارد بر اعضای قاب تحت بارهای بهره‌برداری را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند. علاوه بر این، این روش در تحلیل غیرخطی Push Over نیز برای به دست آوردن رابطه نیرو-تغییر مکان دیوار برشی فولادی و تخمین نیروهای نهایی در المان‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. روش مدل نواری در آیین‌نامه طراحی کانادا (CSA 2001) به‌عنوان یک روش معتبر برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی معرفی شده است. در این آیین‌نامه، به‌منظور مدل‌سازی ورق جان و ارزیابی اثرات بارهای توزیع‌شده بر اعضای مرزی قاب، استفاده از حداقل ۱۲ نوار با فواصل مساوی و دو انتهای مفصلی توصیه شده است. در این روش، زاویه قرارگیری نواریهای کششی تابعی از سطح مقطع ستون‌ها و تیرها، ابعاد قاب و ضخامت ورق فولادی می‌باشد. از آنجاکه محل تقاطع نواریهای کششی میان قاب‌ها در بالا و پایین تیر لزوماً در یک نقطه واحد رخ نمی‌دهد، در صورت مدل‌سازی دقیق زاویه تنش کششی در هر طبقه، تیر باید به قطعات متعددی تقسیم گردد. طول این قطعات در حالت وجود n نوار (با در نظر گرفتن تنها یک ورق جان) محاسبه می‌شود.

$$\Delta_x = \frac{1}{n} [L + h \cdot \tan \alpha] \quad (\text{رابطه ۳-۱})$$

Δ_x : طول هر قطعه ایجادشده روی تیر بین گره‌ها

L: طول پانل پرکننده (فاصله محور تا محور ستون‌های طرفین دیوار)

n: تعداد نوار

h: ارتفاع پانل پرکننده (مرکز به مرکز تیرهای بالا و پائین دیوار)

مساحت هر نوار معادل، در این روش برابر است با:

$$A_s = \frac{[L \cos(\alpha) + h \sin(\alpha) t_w]}{n} \quad (\text{رابطه ۲-۳})$$

t_w : ضخامت ورق

زاویه تنش کششی در ورق برابر است با:

$$(\tan \alpha)^4 = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360 L I_c} \right)} \rightarrow \alpha = \tan^{-1} \left(\sqrt[4]{\frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360 L I_c} \right)}} \right) \quad (\text{رابطه ۳-۳})$$

h: ارتفاع پانل پرکننده

L: طول پانل پرکننده

A_c : سطح مقطع یکی از ستون‌ها (المان مرزی قائم)

A_b : سطح مقطع یکی از تیرها (المان مرزی افقی)

I_c : ممان اینرسی ستون حول محور عمود بر صفحه قاب (المان مرزی قائم)

نکته قابل توجه این است که مدل نواری به زاویه میدان کششی (α) وابسته بوده و با تغییر ابعاد المان‌های

مرزی، مقدار این زاویه نیز تغییر می‌کند. در نتیجه، روند تکراری محاسبات برای تعیین دقیق پارامترهای

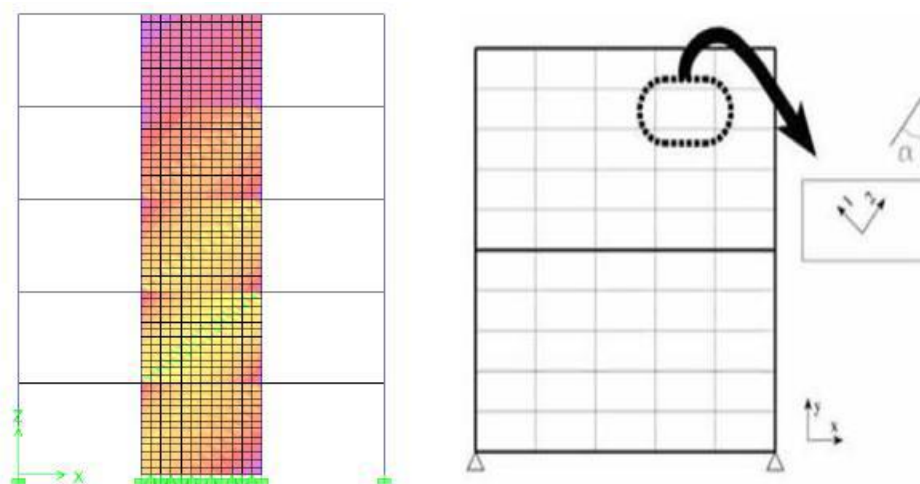
طراحی می‌تواند طولانی و گاه خسته‌کننده باشد. برای ساده‌سازی فرآیند، می‌توان در گام نخست زاویه α را

برای تمام دیوارهای برشی طبقات یکسان در نظر گرفت و مقدار آن را در بازه‌ای بین ۳۲ تا ۵۵ درجه فرض

نمود. لازم به ذکر است که اگر در پایان محاسبات، اختلاف زاویه واقعی با مقدار فرض شده بیش از ۵ درجه باشد، نتایج نهایی از دقت کافی برخوردار نخواهند بود.

۳-۳-۲- روش مدل غشائی غیر همسان

المان‌های غشائی می‌توانند برای مدل‌سازی رفتار ورق‌های جان دیوار برشی فولادی به کار گرفته شوند. به منظور شبیه‌سازی صحیح تفاوت میان مقاومت فشاری و کششی این ورق‌های نازک، در نرم‌افزار ETABS از المان‌های غیرهمسان استفاده می‌شود. درواقع، مدل غشائی اساساً نوعی مدل نواری کششی است که در آن تنش‌های کششی قطری در جان ورق محاسبه می‌شوند. برای انتقال مناسب نیروهای تنشی به المان‌های مرزی، مش‌بندی المان غشائی باید به اندازه کافی ریز باشد. پروفیسور آستانه اصل (۲۰۰۱) پیشنهاد کرده است که در هر جهت حداقل چهار تقسیم‌بندی انجام شود تا در مجموع ۱۶ المان در هر پانل ایجاد گردد. در شکل مربوطه، نمونه‌ای از المان غشائی غیرهمسان نمایش داده شده است که طی آن پانل به پنج بخش مساوی در هر جهت تقسیم شده و محور محلی المان‌ها در امتداد زاویه محاسباتی تنش‌ها چرخانده شده است (شکل ۵-۳).



شکل ۵-۳، مدل غشائی دیوار برشی فولادی جهت تحلیل

۳-۳-۳- روش تحلیل غیر خطی

تحلیل غیرخطی یکی از روش‌های بسیار کاربردی در طراحی دیوارهای برشی فولادی محسوب می‌شود. در این روش، از المان‌های نواری غیرخطی می‌توان در مدل نواری استفاده کرد تا اثرات تسلیم کششی یکنواخت جان در المان‌های مرزی افقی و قائم لحاظ گردد. تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) ابزاری مناسب برای تعیین نیروهای واقعی طراحی در المان‌های مرزی است که می‌توان آن را با استفاده از نرم‌افزارهای قدرتمند المان محدود نظیر ABAQUS و ETABS انجام داد. نتایج نشان می‌دهند که نیروهای محوری و برشی حاصل از این روش معمولاً کمتر از مقادیر به‌دست‌آمده از روش طراحی ظرفیتی هستند و همین امر باعث می‌شود تحلیل غیرخطی روشی دقیق‌تر و اقتصادی‌تر در طراحی دیوارهای برشی فولادی به شمار رود.

۳-۳-۴- روش تحلیل اجزاء محدود

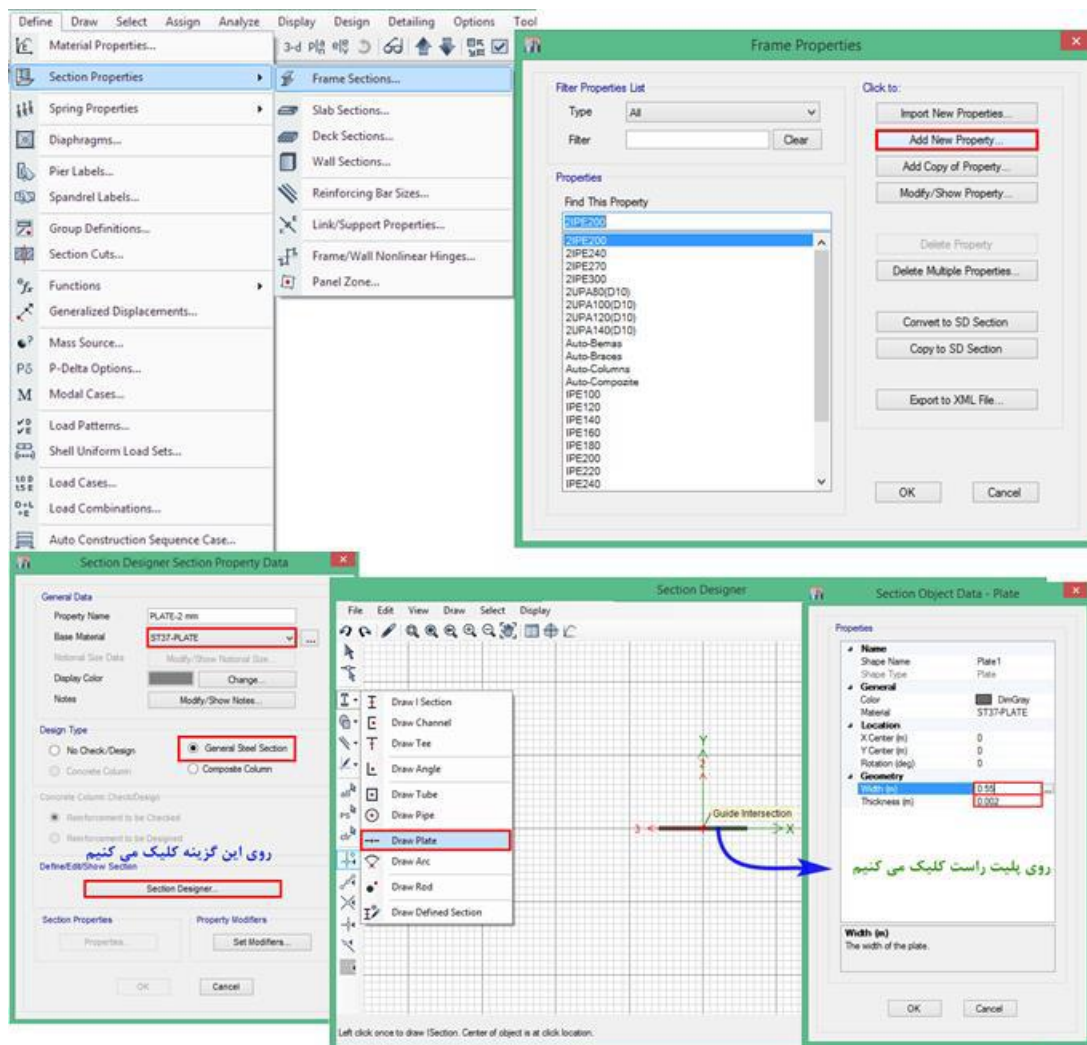
بهترین و دقیق‌ترین روش برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی، استفاده از روش اجزای محدود است که معمولاً با نرم‌افزارهای پیشرفته‌ای مانند ABAQUS و ANSYS انجام می‌شود. در این روش، دیوار برشی به صدها المان کوچک تقسیم شده و اثر متقابل هر المان بر دیگری بررسی می‌گردد تا رفتار کلی سازه به‌طور واقع‌بینانه شبیه‌سازی شود. یکی دیگر از رویکردها، روش غشایی ارتوتروپیک است که در آن دیوار به‌صورت یک لایه غشایی با خواص غیرهمسان مدل می‌شود و با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین روش تحلیل غیرخطی (Pushover) با مدل‌سازی دیوار برشی و المان‌های مرزی در نرم‌افزارهای تحلیل سازه، امکان بررسی ورود سیستم به ناحیه پلاستیک را فراهم می‌سازد. ترکیب این روش با اجزای محدود موجب دستیابی به نتایج بسیار دقیق‌تر در تحلیل رفتار دیوارهای برشی فولادی می‌شود.

۳-۴- مدلسازی دیوار برشی فولادی در ETABS

مراحل مدلسازی دیوار برشی فولادی را می‌توان به صورت خلاصه و منظم به شرح زیر بیان کرد:

- ❖ تعریف خصوصیات ورق شامل مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و سایر مشخصات مکانیکی.
- ❖ معرفی و اعمال شرایط مرزی گره‌های پای ستون‌ها برای تثبیت قاب.
- ❖ تقسیم‌بندی تیرها و ستون‌های قاب از طریق ایجاد گره‌ها به منظور افزایش دقت مدلسازی.
- ❖ ترسیم المان‌های مورب (نوارهای معادل) در ورق جان به منظور شبیه‌سازی میدان کششی.
- ❖ یکپارچه‌سازی المان‌های تقسیم‌بندی‌شده برای انتقال صحیح نیروها و تغییرشکل‌ها.
- ❖ چرخش محور محلی المان‌های مورب تا در راستای میدان کششی قرار گیرند.
- ❖ غیرفعال کردن مقاومت فشاری المان‌های مورب تا تنها در کشش عمل کنند.
- ❖ انجام تحلیل و طراحی سازه بر اساس بارگذاری‌های جانبی و ثقلی.
- ❖ کنترل تنش (Ratio) در المان‌های مورب به منظور اطمینان از صحت طراحی.

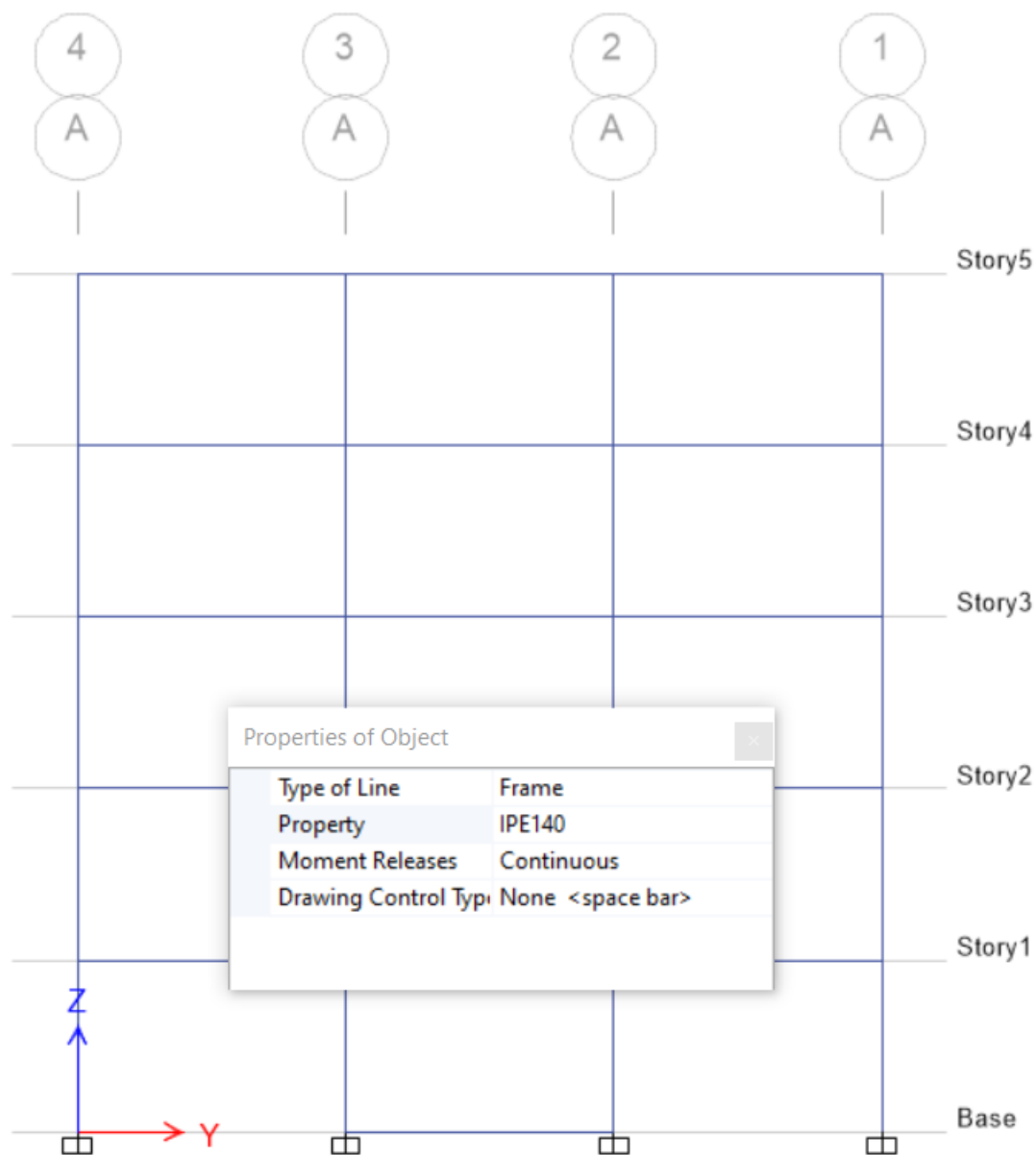
در گام نخست، با توجه به ابعاد تیر و ستون‌های مرزی و ضخامت ورق جان به‌دست‌آمده از مراحل قبل، ورق‌هایی با ضخامت محاسبه‌شده و عرض تقریبی $0/52$ یا $0/62$ متر تعریف و به مدل اختصاص داده می‌شوند.



شکل ۳-۶، تعریف ورق برای دیوار برشی فولادی

در گام دوم، در تراز Base قاب دیوار برشی یک تیر ترسیم می‌شود تا به‌عنوان تکیه‌گاه عمل کرده و

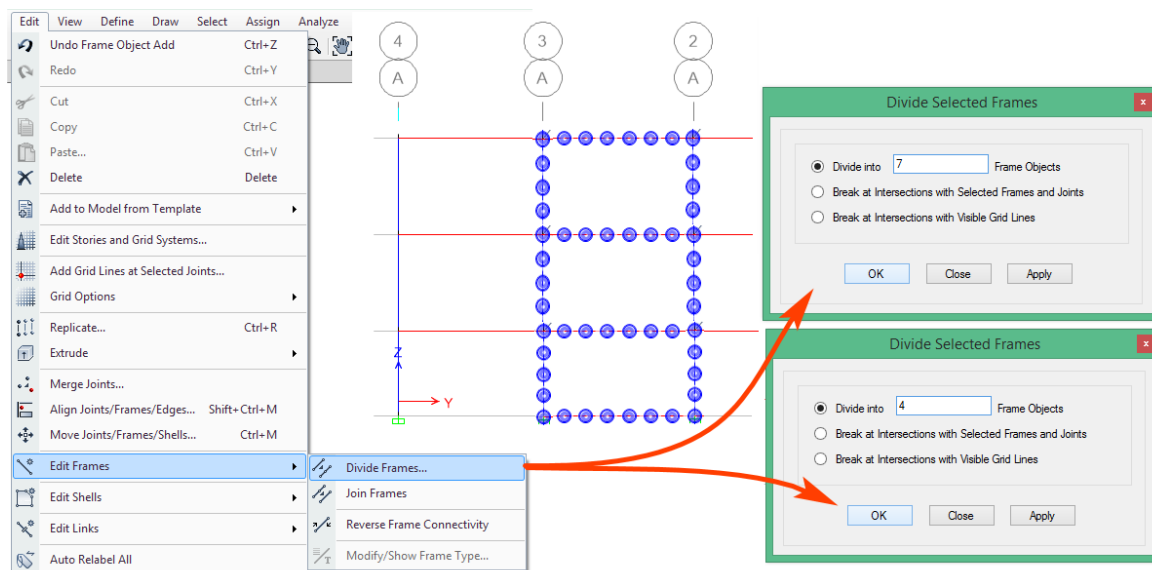
امکان اتصال و معرفی گره‌های پای ستون برای المان‌های مورب فراهم گردد.



شکل ۳-۷، ترسیم المان افقی در تراز Base قاب دارای دیوار برشی

در گام سوم، تیرها و ستون‌های المان مرزی انتخاب شده و به گونه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند که امکان

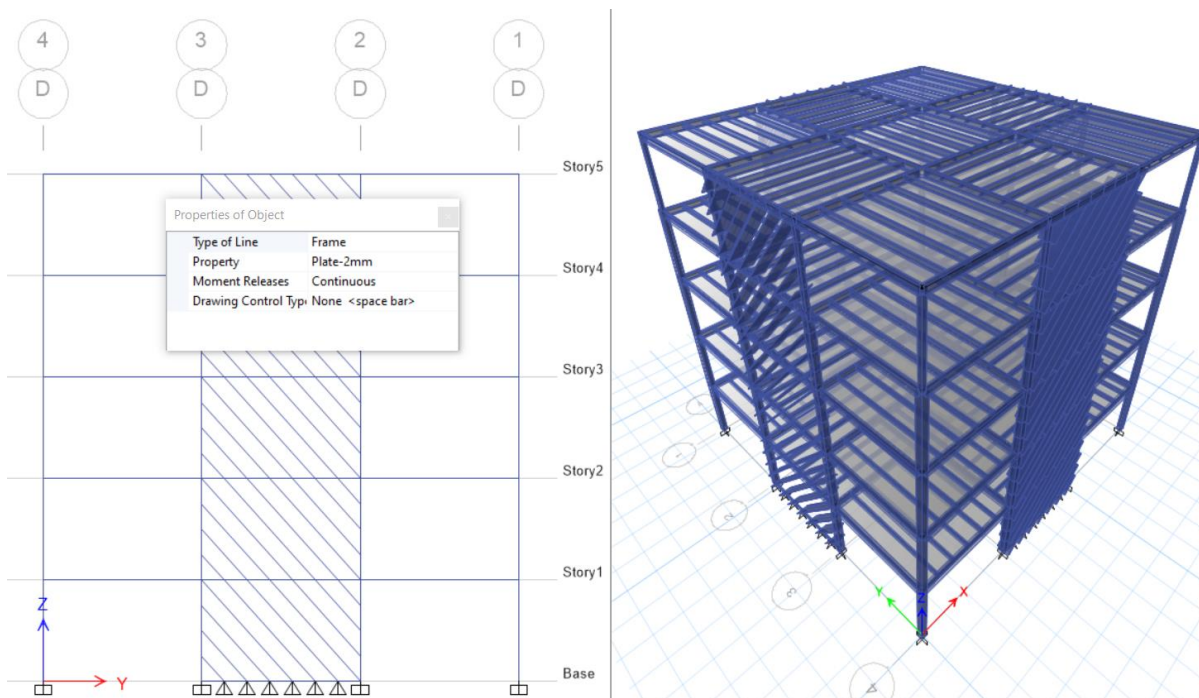
ترسیم ۱۰ میلۀ مورب در هر پانل دیوار فراهم گردد.



شکل ۳-۸، تقسیم‌بندی تیرها و ستون‌های قاب

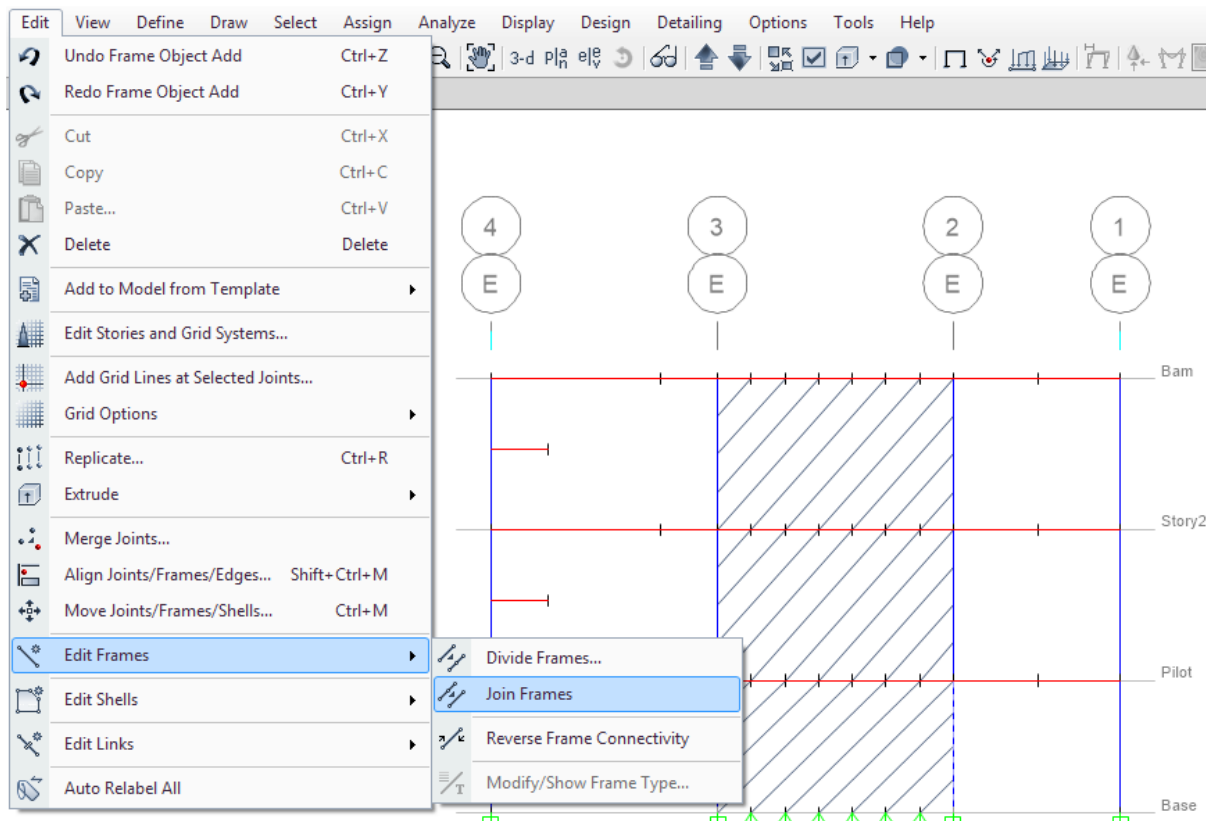
در گام چهارم، با استفاده از دستور Frame در پنجره بازشده، مقطع تعریف‌شده در مراحل قبل انتخاب

شده و اعضای مورب (نوارهای معادل) در مدل ترسیم می‌شوند.



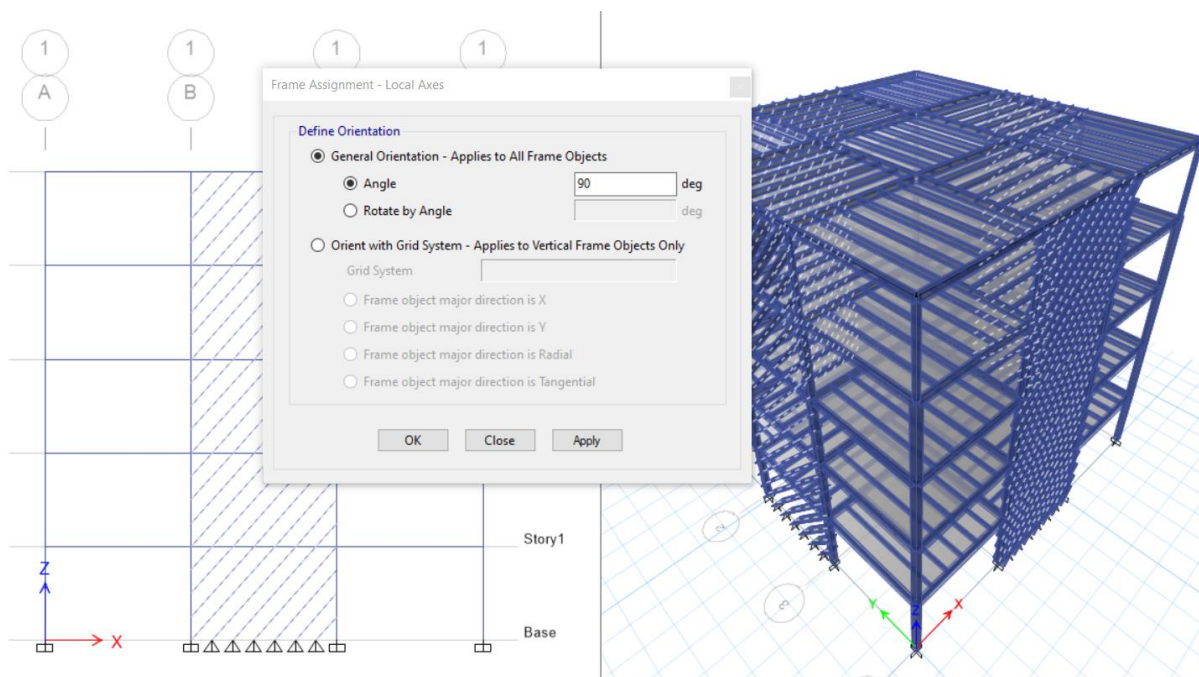
شکل ۳-۹، ترسیم المان‌های مورب

در گام پنجم، تیر موجود در تراز Base حذف شده و سپس تیرها و ستون‌های مرزی انتخاب و یکپارچه‌سازی المان‌های تقسیم‌بندی شده انجام می‌شود.



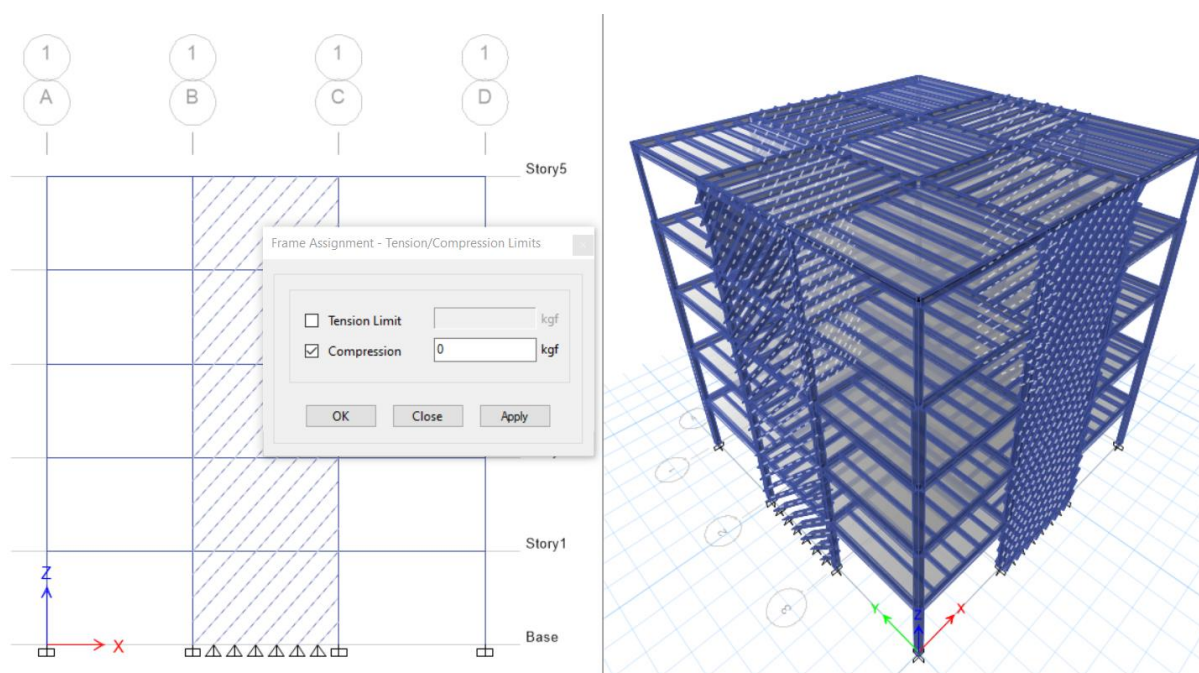
شکل ۳-۱۰، یکپارچه نمودن المان‌های تقسیم‌بندی شده

در گام ششم، اعضای مورب انتخاب شده و محور محلی آن‌ها به میزان ۹۰ درجه چرخانده می‌شود تا با جهت میدان کششی هماهنگ گردد.



شکل ۳-۱۱، چرخش محور محلی المان‌های مورب

در گام هفتم، با توجه به اینکه میله‌های مورب تنها برای تحمل کشش در نظر گرفته شده‌اند، آن‌ها انتخاب شده و مقاومت فشاری آن‌ها غیرفعال می‌شود تا در بارگذاری تنها نقش کششی ایفا کنند.



شکل ۳-۱۲، غیرفعال کردن مقاومت فشاری المان‌های مورب

در گام هشتم، پس از تکمیل تنظیمات مدل و اعمال بارگذاری‌های مورد نظر، فرآیند تحلیل و طراحی سازه آغاز می‌شود. در گام نهم، از آنجا که المان‌های مورب تنها برای تحمل کشش طراحی شده‌اند، مقدار Ratio آن‌ها صرفاً در حالت کشش کنترل و ارزیابی می‌شود.



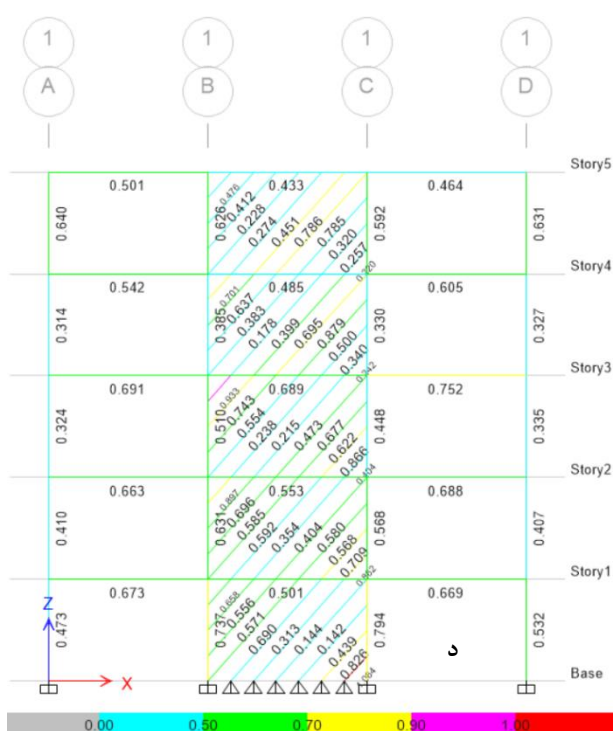
شکل ۳-۱۳، طراحی المان‌های مورب دیوار برشی

فصل چهارم

نتایج تحقیق

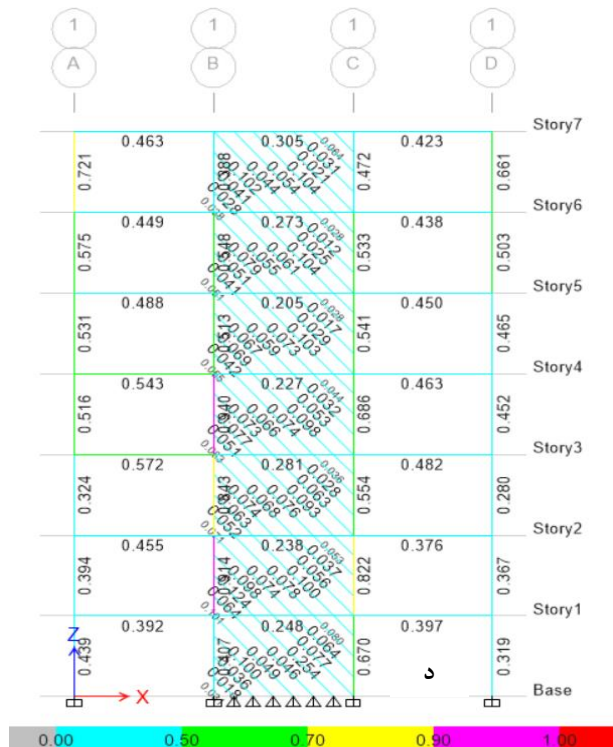
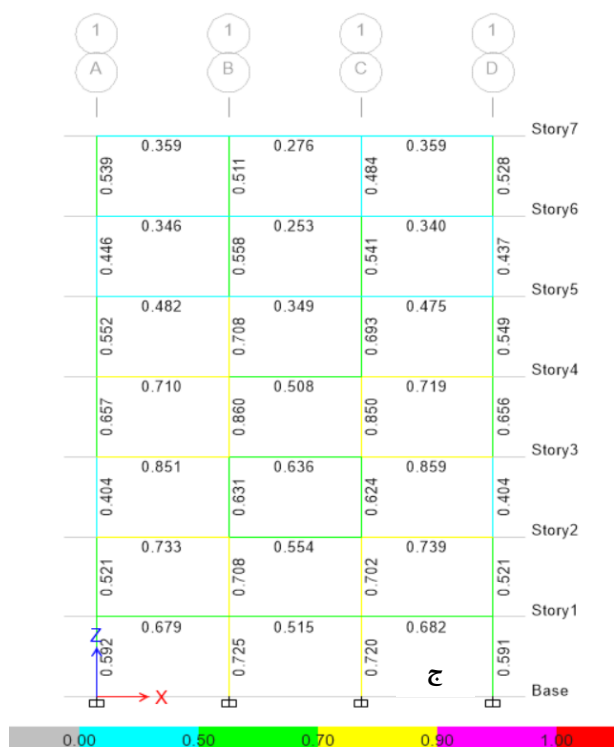
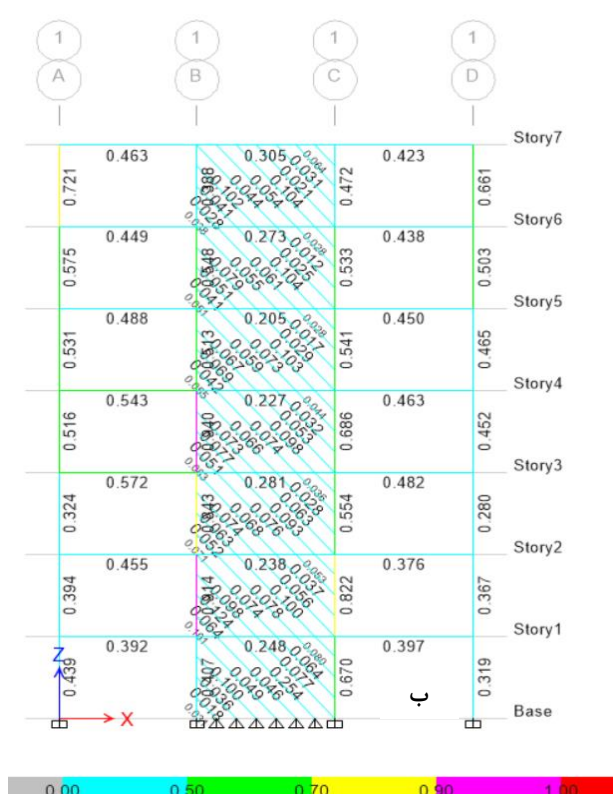
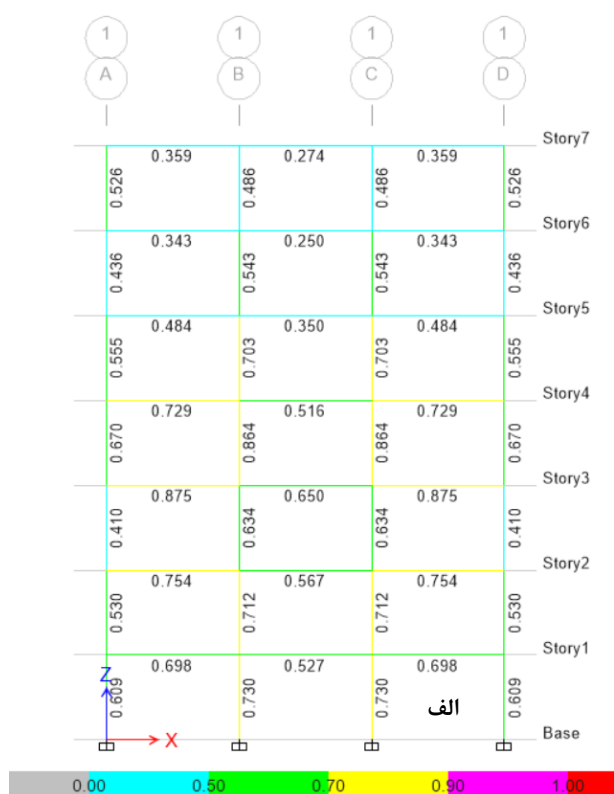
۴-۱- نتایج نسبت نیرو به ظرفیت اعضا

نسبت نیرو به ظرفیت اعضا یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی ایمنی و کارایی سازه‌ها به شمار می‌رود، زیرا بیانگر میزان بهره‌برداری از ظرفیت باربری واقعی هر عضو تحت اثر بارهای مختلف است. کاهش این نسبت به‌طور مستقیم به معنای افزایش حاشیه ایمنی سازه و بهبود رفتار آن در برابر نیروهای جانبی و ثقلی می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که با به‌کارگیری دیوارهای برشی فولادی، میانگین نسبت نیرو به ظرفیت اعضا حدود ۱۱ تا ۱۳ درصد در سازه‌های منظم و در سازه‌های نامنظم به نزدیک ۲۰ درصد کاهش یافته است. این کاهش، از منظر مهندسی سازه، اهمیت بالایی دارد زیرا نشان‌دهنده جذب و توزیع مناسب‌تر نیروها توسط سیستم مقاوم جانبی می‌باشد. عملکرد مطلوب دیوارهای برشی فولادی باعث می‌شود اعضای دیگر نظیر تیرها و ستون‌ها کمتر تحت فشار قرار گیرند و از تمرکز تنش در نقاط حساس جلوگیری شود. همچنین این پدیده موجب افزایش شکل‌پذیری کلی سازه و ارتقای سطح عملکرد آن در سطوح مختلف بهره‌برداری و طراحی لرزه‌ای می‌گردد. از طرف دیگر، کاهش نسبت نیرو به ظرفیت می‌تواند بهینه‌سازی در ابعاد و مقاطع اعضای اصلی را نیز تسهیل نماید. بدین ترتیب استفاده از دیوارهای برشی فولادی نه تنها ایمنی را ارتقا می‌دهد بلکه می‌تواند از نظر اقتصادی نیز به صرفه باشد. در مجموع، یافته‌های حاصل‌شده موید آن است که این نوع سیستم مقاوم جانبی نقش بسزایی در بهبود پاسخ لرزه‌ای و کاهش آسیب‌پذیری سازه‌ها ایفا می‌کند. مقایسه نسبت نیرو به ظرفیت اعضا در سازه‌های منظم و نامنظم برای سازه‌های ۵، ۷ و ۱۲ طبقه به ترتیب در اشکال (۴-۱) تا (۴-۳) نشان داده شده است.



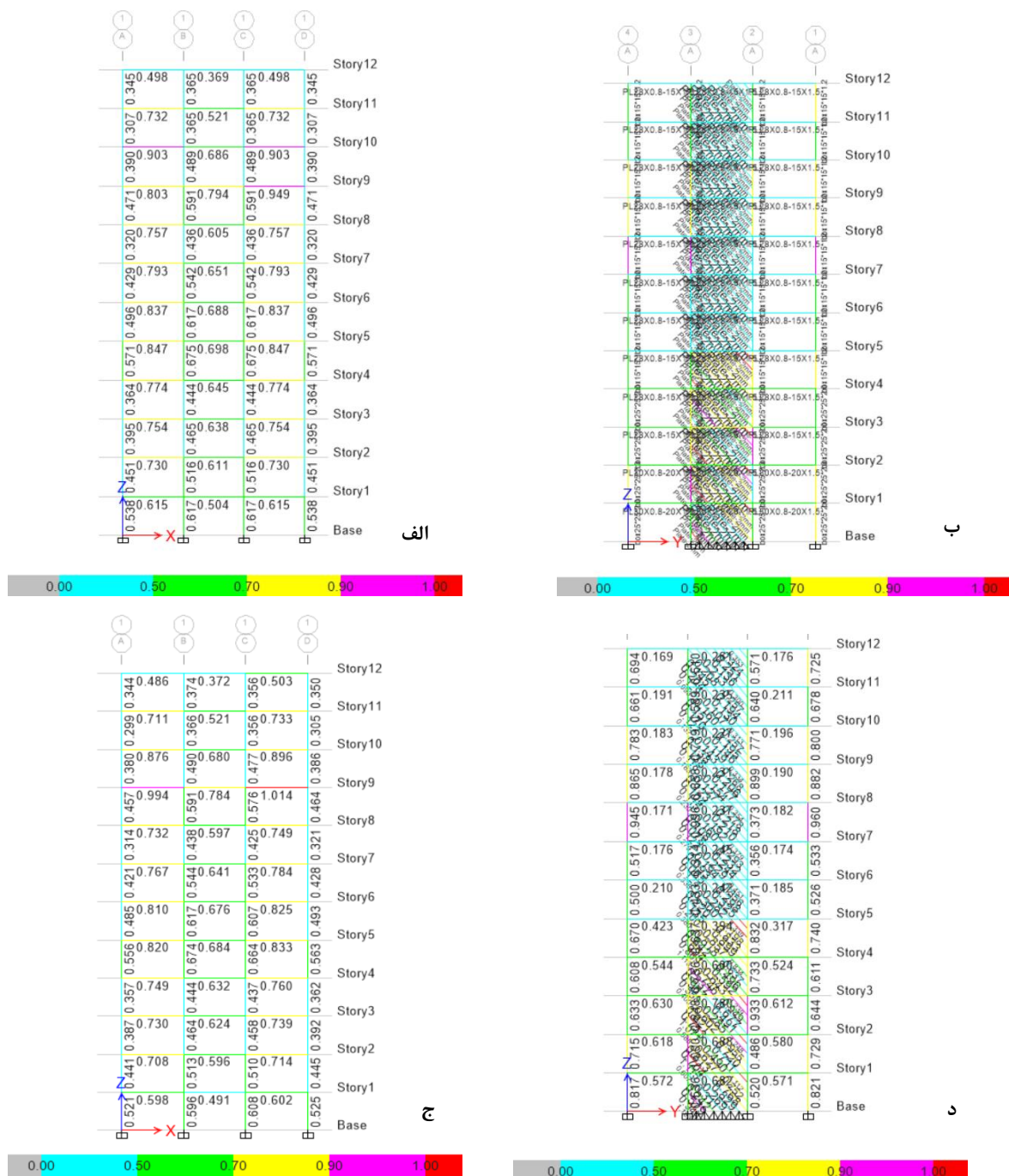
شکل ۴-۱، مقایسه نسبت نیرو به ظرفیت قاب بحرانی سازه ۵ طبقه با و بدون دیوار برشی فولادی؛ (الف) منظم بدون

دیوار برشی، (ب) منظم با دیوار برشی، (ج) نامنظم بدون دیوار برشی، (د) نامنظم با دیوار برشی



شکل ۴-۲، مقایسه نسبت نیرو به ظرفیت قاب بحرانی سازه ۷ طبقه با و بدون دیوار برشی فولادی؛ الف) منظم بدون

دیوار برشی، ب) منظم با دیوار برشی، ج) نامنظم بدون دیوار برشی، د) نامنظم با دیوار برشی



شکل ۴-۳، مقایسه نسبت نیرو به ظرفیت قاب بحرانی سازه ۱۲ طبقه با و بدون دیوار برشی فولادی؛ الف) منظم بدون

دیوار برشی، ب) منظم با دیوار برشی، ج) نامنظم بدون دیوار برشی، د) نامنظم با دیوار برشی

منابع

- [۱] Thorburn, L. J., Kulak, G. L., & Montgomery, C. J. (1983). Analysis of steel plate shear walls (Structural Engineering Report No. 107). Department of Civil Engineering, University of Alberta.
- [۲] Berman, J. W., & Bruneau, M. (2003). Experimental investigation of light-gauge steel plate shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 129(11), 1444–1456. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:11\(1444\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:11(1444)).
- [۳] Wang, M., Yang, W., Shi, Y., & Xu, J. (2015). Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials. *Journal of Constructional Steel Research*, 107, 194-210.
- [۴] Abraham, N. M., & SD, A. K. (2019). Analysis of irregular structures under earthquake loads. *Procedia Structural Integrity*, 14, 806-819.
- [۵] Kulak, G. L. (2001). Steel Plate Shear Walls—An Overview. *Engineering Journal*, 38(4), 169–179.
- [۶] Astaneh-asl, A , (2001) , "seismic behavior and design of steel shear walls".
- [۷] حسین‌لو، ح.، سانیب، س. ح.، پروینی‌ب، م. (۱۳۹۳). اصول و مبانی طراحی دیوارهای برشی فولادی. تهران: انتشارات ادیبان روز.
- [۸] Roberts, T. M. (1995). Seismic resistance of steel plate shear walls. *Engineering Structures*, 17(10), 735–744.
- [۹] Hooper, J. D., & Seilie, I. F. (2005). Steel Plate Shear Walls: An Overview. *Modern Steel Construction*, 45(4), 44–49.

[۱۰] هاشمی، م. ج. (۱۳۹۹). دیوار برشی فولادی؛ طراحی دیوار برشی فلزی به همراه جزئیات اجرایی

آن.

[۱۱] Abaqus simulia 2016.

[۱۲] Astaneh-Asl, A. (2001). Seismic behavior and design of steel shear walls. Structural Steel Educational Council.

[۱۳] Choi, I. Park, H. (2008). Cyclic Test for Framed Steel Plate Walls with Various Infill Plate Details. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.

[۱۴] Park, H. G., Kwack, J. H., Jeon, S. W., Kim, W. K., and Choi, I. R. (2007). Framed steel plate wall behavior under cyclic lateral loading. Journal of Structural Engineering 133:3, 378-388.

[۱۵] Shekastehband, Behzad. Azaraxsh, Aliakbar. Showkati, Hossein, (2017). Experimental and numerical study on seismic behavior of LYS and HYS steel plate shear walls connected to frame beams only, civil and mechanical engineering, Vol 17, pp: 154–168.

[۱۶] Wang, M., Yang, W., Shi, Y., & Xu, J. (2015). Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials. Journal of Constructional Steel Research, 107, 194-210.

[۱۷] Krishnan, S. (2007). Case studies of damage to 19-storey irregular steel moment-frame buildings under nearsource ground motion. Earthquake engineering & structural dynamics, 36(7), 861-885.

[۱۸] Bai, Y., Li, Y., Tang, Z., Bittner, M., Broggi, M., & Beer, M. (2021). Seismic collapse fragility of low-rise steel moment frames with mass irregularity based on shaking table test. Bulletin of Earthquake Engineering, 19(6), 2457-2482.

[١٩] Kumar, A., & Matsagar, V. (2018). Blast fragility and sensitivity analyses of steel moment frames with plan irregularities. *International Journal of Steel Structures*, 18(5), 1684-1698.

[٢٠] Cao, Y., Wakil, K., Alyousef, R., Yousif, S. T., Jermsittiparsert, K., Ho, L. S., . . . Mohamed, A. M. (2020). Computational earthquake performance of plan-irregular shear wall structures subjected to different earthquake shock situations. *Earthquakes and Structures*, 18(5), 567-580.

[٢١] Zhang, Y., & Mueller, C. (2017). Shear wall layout optimization for conceptual design of tall buildings. *Engineering Structures*, 140, 225-240.

[٢٢] Abraham, N. M., & SD, A. K. (2019). Analysis of irregular structures under earthquake loads. *Procedia Structural Integrity*, 14, 806-819.